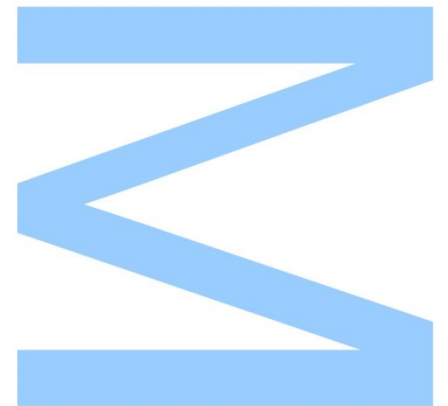


Estudo petrográfico e geoquímico das sequências carbonatadas do anticlinal de Cribas no distrito de Manatuto, Timor-Leste



Francisco Olívio da Silva

Mestrado em Geologia

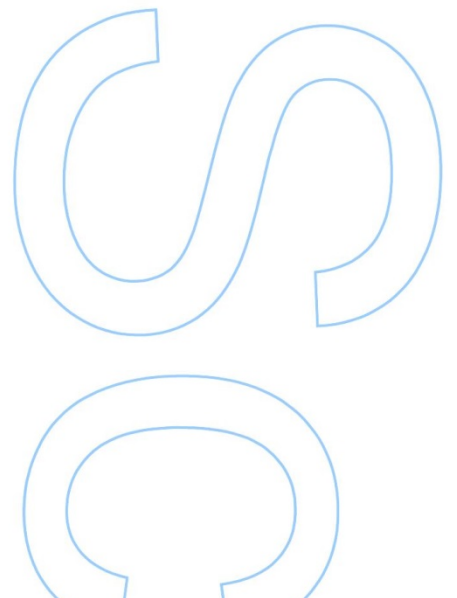
Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território
2017

Orientador

Doutora Deolinda Maria dos Santos Flores Marcelo da Fonseca, Professora Catedrática, Faculdade de Ciência da Universidade do Porto

Coorientador

Doutor Pedro Miguel Madureira Pimenta Nogueira, Professor Auxiliar, Departamento de Geociências da Universidade de Évora.

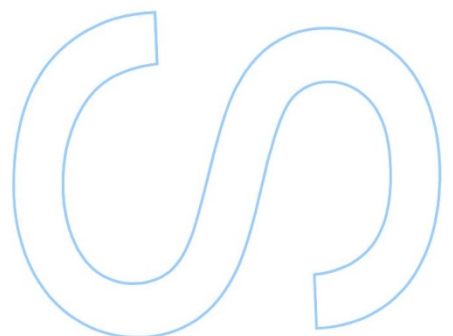
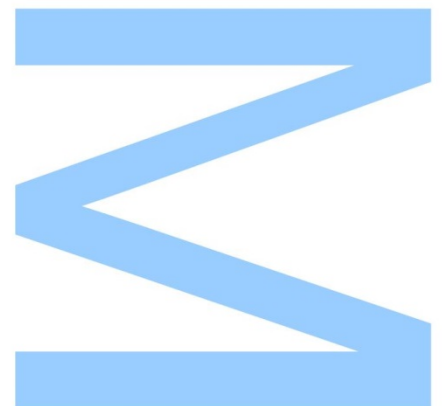




Todas as correções determinadas
pelo júri, e só essas, foram efetuadas.

O Presidente do Júri,

Porto, ____/____/____



Agradecimentos

No fundo do meu coração gostaria de deixar a minha gratidão para aqueles que me ajudaram e apoiaram durante este longo trabalho.

Em primeiro lugar quero agradecer à minha Orientadora, Professora Doutora Deolinda Flores por ter aceitado para guiar, orientar e apoiar este trabalho até ao final.

Ao meu Coorientador Professor Doutor Pedro Nogueira que deu as informações fundamentais para a recolha das amostras e a sua colaboração de oferecer algumas amostras para reforçar esse trabalho.

À Professora Doutora Paula Gonçalves que esteve sempre disponível para ajudar nos laboratórios do DGAOT-FCUP desde a preparação das amostras até os trabalhos laboratoriais e as suas discussões dos resultados.

À Dra. Cândida Maria Pinto da Silva Faria Garcia Neto, responsável pelo Laboratório de Química Orgânica e Inorgânica (DGAOT-FCUP), que estava sempre disponível para acompanhar na preparação das superfícies polidas.

Ao Laboratório de Palinofácies e Fácies Orgânicas da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil (LAFO) e ao seu responsável Professor Doutor João Graciano Mendonça Filho pelo apoio na realização das análises geoquímicas orgânicas e na preparação das lâminas de palinofácies das minhas amostras.

À minha família principalmente aos meus pais e meus irmãos que sempre me deram a coragem e força necessárias para ultrapassar os desafios ao longo deste trabalho.

À minha namorada Dioclesia Jusefina Savio por ter acompanhado na recolha das amostras, a coragem e ajuda durante a elaboração do trabalho.

Aos meus amigos e colegas que sempre me apoiaram directa ou indirectamente durante este trabalho.

Os vossos apoios, dedicações e auxílios foram essenciais para ultrapassar esses desafios.

Para todos vocês os meus sinceros agradecimentos.

Resumo

O território de Timor Leste é constituído maioritariamente por rochas sedimentares depositadas na plataforma continental. As sequências sedimentares do Pérmico ao Jurássico no centro do território são uma das unidades parautóctones com importância no estudo da matéria orgânica desta região.

A caracterização da matéria orgânica, efectuada através de metodologias da geoquímica e petrologia orgânicas, em vinte e oito amostras colhidas em dez afloramentos ao longo da estrada de ligação entre Manatuto e Laclubar, nas Formações de Wailui, Aituto e Cribas. Foi, ainda, incluindo neste estudo quatro amostras pertencentes às Formações de Wailuli, Aituto, Cribas e Atahoc.

A Formação Wailuli é de idade Triásico Superior-Jurássico sendo constituída por uma espessa sequência de argilitos com intercalações de margas laminadas, calcilutitos, argilitos micáceos e arenitos quártzicos. A Formação Aituto é do Triásico Superior, compreende uma sequência rítmica com a alternância de bancadas pouco espessas de calcários rosa, argilitos e xistos argilosos, com predomínio da componente carbonatada. A Formação Cribas é datada da idade Pérmico, e é constituída maioritariamente por xisto com matéria orgânica na base e intercalada com arenitos no topo. A Formação de Atahoc é de idade Pérmica e constituída principalmente por argilitos negros finamente laminados com intercalações de arenitos quártzicos maciços de grão fino e rochas vulcânicas.

Os valores de carbono orgânico total das amostras são muito baixos indicando que são pobres em matéria orgânica. Nalguns casos, os teores mais elevados estão associados à presença de betumes sólidos. O enxofre total é baixo e o teor em CaCO_3 evidencia que as amostras de Formação Wailuli, Cribas e Atahoc apresentam um carácter pelítico e a Formação Aituto mais carbonatado.

A matéria orgânica das amostras estudadas é essencialmente de natureza continental constituída por macerais predominantemente dos grupos da

vitrinte e da inertinite. A liptinite é escassa. Foram, ainda, identificados betumes sólidos e zooclastos. Os betumes sólidos são comuns em todas as formações ocorrendo várias famílias distinguidas de acordo com a reflectância, sendo classificados como epi-impsonite e meta-impsonite.

A ocorrência de partículas de vitrinte retrabalhadas e a presença de quitinozoários é indicativo de contribuição de matéria orgânica proveniente de formações mais antigas, anteriores ao Devónico.

A MO na sequência estudada é essencialmente de origem continental proveniente de plantas terrestre e considerada como cerogénio tipo III.

A maturação térmica da MO está na fase catagénese, cuja reflectância da vitrinte varia entre 0,7% a 2,0%, sendo devida ao aumento do gradiente geotérmico.

Os baixos teores de COT, associados à maturação térmica da MO e à presença de betumes sólidos indicam que estas formações poderão ter produzido petróleo, sendo que a MO presente se considera residual.

O facto de a maturação térmica estar dentro da catagénese e a MO ser um cerogénio tipo III, poderia indicar boas condições para a produção de gás. Porém, os teores de COT não são suficientes para a produção deste tipo de hidrocarbonetos.

Palavras-chave: Geoquímica e petrologia orgânicas, sequências carbonatadas e pelíticas, Materia orgânica (MO); Vitrinte, Inertinite, COT, Formação de Wailuli, Formação de Aituto, Formação de Cribas e Formação de Atahoc.

Abstract

The East Timor territory consists predominantly of sedimentary rocks deposited on the continental shelf. The sedimentary sequences of Permian to Jurassic in the center of the territory are one of the parautochthonous units with importance in the study of the organic matter of this region.

The characterization of the organic matter, using organic geochemistry and petrology methodologies, was carried out in twenty - eight samples collected in ten outcrops along the connecting road between Manatuto and Laclubar, in the Wailui, Aituto and Cribas formations. It was also included in this study four samples belonging to the Wailuli, Aituto, Cribas and Atahoc formations.

The Late Triassic to Jurassic Wailuli Formation is a thick succession of mudstone with some well-bedded marls, calcilutites, micaceous shales and quartz sandstones. The Triassic Aituto Formation is a rhythmically bedded white to pink limestone with thin interbedded dark gray shales, with predominance of the carbonated component. The Permian Cribas Formation is dominated mainly by organic-rich shale in the lower section and interbedded to massive sandstones in the upper part. The Atahoc Formation is Permian in age and consists mainly of fine-grained sandstones and volcanic rocks.

The total organic carbon content of the studied samples is very low indicating that they are poor in organic matter. In some cases, the higher contents are associated with the presence of solid bitumen. The total sulfur is low and the CaCO_3 content shows that the Wailuli, Cribas and Atahoc Formation samples have a pelitic character and the Aituto Formation more carbonated.

The organic matter of the studied samples is essentially of continental nature dominated by macerals of the vitrinite and inertinite groups. Liptinite is scarce. Solid bitumen and zooclasts were also identified. The solid bitumen are common in all the formations. Several families were distinguished according to the reflectance, being classified as epi-impsonite and meta-impsonite.

The occurrence and reworked vitrinite particles and the presence of Chitinozoa are indicative of the contribution of organic matter from older formations prior to Devonian.

The organic matter in the studied sequence is essentially of continental origin coming from terrestrial plants and is considered as a kerogen type III.

Thermal maturation of the organic matter is in the catagenesis stage, as vitrinite reflectance ranges from 0.7% to 2.0%, and is due to the geothermal gradient.

The low total organic carbon content associated with the thermal maturation of the organic matter and the presence of solid bitumen indicate that these formations may have produced petroleum, with the present organic matter being considered residual.

The fact that thermal maturation is within the catagenesis and the presence of a kerogen type III could indicate good conditions for the production of gas. However, total organic carbon content are not enough for the production of this type of hydrocarbons.

Keywords: Organic geochemistry and petrology, carbonate and pelitic sequences, Organic matter (OM); Vitrinite, Inertinite, TOC, Wailuli Formation, Aituto Formation, Cribas Formation, Atahoc Formation.

Índice

Agradecimentos	I
Resumo	III
Abstract	V
Índice de figuras	XI
Índice de tabelas	XV
Lista de abreviaturas	XVII
Capítulo 1 - Introdução	1
1.1. Justificação do trabalho	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Conceitos gerais	2
1.3.1. Definição da matéria orgânica	2
1.3.2. Origem e classificação da matéria orgânica	3
1.3.3. Cerogénio	7
1.3.4. Maturação térmica	9
Capítulo 2 - Enquadramento geológico	13
2.1. Formação de Maubisse	18
2.2. Formação de Atahoc	19
2.3. Formação de Cribas	19
2.4. Formação de Aituto	20
2.5. Formação de Wailuli	21

Capítulo 3 - Amostragem e metodologias de estudo	23
3.1. Amostragem.....	23
3.2. Preparação das amostras para estudo petrográfico e geoquímico	28
3.3. Análise do COT, St e RI.....	32
3.4. Análise petrográfica	33
Capítulo 4 - Resultados e interpretação dos dados	35
4.1. Descrição dos afloramentos.....	35
4.1.1. Formação de Wailuli	38
4.1.2. Formação de Aituto	40
4.1.3. Formação de Cribas	46
4.2. Geoquímica orgânica	47
4.2.1. Formação de Wailuli	47
4.2.2. Formação de Aituto	48
4.2.3. Formação de Cribas	48
4.2.4. Formação de Atahoc	48
4.3. Petrologia orgânica	50
4.3.1. Formação de Wailuli	50
4.3.2. Formação de Aituto	58
4.3.3. Formação de Cribas	68
4.3.4. Formação de Atahoc	73
4.4. Maturação da matéria orgânica	76

4.4.1. Formação de Wailuli	77
4.4.2. Formação de Aituto.....	79
4.4.3. Formação de Cribas	81
4.4.4. Formação de Atahoc.....	81
Capítulo 5 - Considerações finais	83
Referências bibliografias	87
Anexo 1	91

Índice de figuras

Figura 1.1. Diagrama de Van Krevelen e tipo de cerogénio (Adotado de Tissot & Welte, 1984).	8
Figura 1.2. Fases da maturação térmica da MO (Adotado de Tissot & Welte, 1984).	10
Figura 2.1. Localização da ilha de Timor na região sudeste Asiático marcada com uma elipse vermelha. Imagem adotada de http://www.mapas-asia.com/sudeste.htm . Consultado em 12/10/2016.	13
Figura 2.2. Carta geológica de Timor-Leste. (Audley-Charles, 1968 in Carvalho & Lisboa, 2003).	14
Figura 2. 3. Mapa geológico-estrutural da área de Cribas (SERN, 2012 em Lopes et al., 2012).	16
Figura 2. 4. Sequência estratigráfica do Pérmico-Jurássico de Timor-Leste (Charlton, 2002).	17
Figura 3.1. Localização da área do estudo, visualização do Google Earth.	23
Figura 3.2. Alguns equipamentos geológicos utilizados no campo.	24
Figura 3.3. Referência e localização das amostras recolhidas no campo.	25
Figura 3.4. Moagem das amostras. A) utensílios de moagem e limpeza; B) moagem à mão; C) amostras moídas a 1mm devidamente acondicionadas e etiquetadas.	28
Figura 3.5. Preparação dos blocos para polimento de uma superfície.	29
Figura 3.6. A) Máquina de pré-polimento e B) Máquina de polimento.	31
Figura 3.7. Exsicador para secar as amostras.	31

- Figura 3.8. Microscópio petrográfico (Leica DM4000 equipado com o software “Fossil” da Technisches Büro Hilgers) com iluminação LED (branca e azul), câmaras de cor e preto e branco e software para determinação da reflectância, aquisição de fotografias (software “Discus”) e observação em luz branca e fluorescência. Inclui platina motorizada. 33
- Figura 4.1. Mapa de localização dos afloramentos onde foram colhidas as amostras pertencentes à Formação de Wailuli.....39
- Figura 4.2. Afloramentos da Formação de Wailuli. A. Afloramento A; B. Afloramento I; e, C. Afloramento J.....40
- Figura 4.3. Localização dos afloramentos na Formação de Aituto.42
- Figura 4.4. Afloramentos da Formação de Aituto. A. Afloramento C; B. Afloramento D; C. Afloramento E; D. Afloramento F; E. Afloramento G; e, F. Afloramento H.....43
- Figura 4.5. Microfotografias das amostras dos afloramentos D (A e B), E (C e D) e F (E e F). A e B. calcário micrítico com bioclastos de concha fina e alternância de níveis mais escuros e mais claros. C. Calcário micrítico com esparitização. D. Cristais romboédricos de dolomite de substituição a preencher fracturas. E. Calcário micrítico. F. Filonetes de calcite, por vezes muito espessos.....45
- Figura 4.6. A. Localização do afloramento B; B. Afloramento onde foram colhidas as amostras da Formação de Cribas.46
- Figura 4.7. Microfotografias de partículas de vitrinite encontradas na Formação de Wailuli. A, B, C e D: afloramentos A e I; E: amostra AQ_04; e, F: afloramento J.52
- Figura 4.8. Microfotografias dos aspetos da inertinite encontradas nas amostras de Formação Wailuli. A, B e D: afloramentos A e I; C: amostra AQ_04.....53
- Figura 4.9. Microfotografias da liptinite das amostras de Formação Wailuli do afloramento J.54

- Figura 4.10. A e B: Microfotografias do aspeto dos betumes sólidos; C a F. Histograma com os valores de reflectância das famílias de betumes sólidos (BS) medidas nas amostras na Formação de Wailuli..... 55
- Figura 4.11. Microfotografia das partículas de zooclastos/zoomorfos das Formação de Wailuli. 56
- Figura 4.12. Microfotografias da matéria mineral (A, B, C e D) nas amostras da Formação de Wailuli. Microfotografias obtidas em luz branca reflectida.... 58
- Figura 4.13. Microfotografias da vitrinite (A, B, C e D) e da inertinite (E e F) da Formação de Aituto. 60
- Figura 4. 14. Microfotografia dos aspectos de liptinite da Formação de Aituto. 62
- Figura 4. 15. Microfotografias de betumes sólidos na Formação de Aituto. A. Betumes sólidos dispersos na matéria mineral do afloramento E; B e E. Betumes sólidos alinhados de reflectância elevada do afloramento D; C. Betumes sólidos do afloramento H e D; E. Betumes sólidos do afloramento C; F. Betumes sólidos do afloramento F. 63
- Figura 4. 16. Histogramas da reflectância dos betumes sólidos (BS) nas amostras da Formação de Aituto. A. amostra FS1H do afloramento H; B. amostra FS2H do afloramento H; C. amostra FS2C do afloramento C; D. amostra FS1D do afloramento D; E. amostra FS3D do afloramento D; F da amostra FS3E do afloramento E; e, G. amostra GA_49_573. 65
- Figura 4.17. Microfotografias das zooclastos observadas na Formação de Aituto..... 66
- Figura 4.18. Microfotografias da matéria mineral da Formação de Aituto. A e B. Carbonatos; C. Minerais de argila, óxidos de ferro e pirite; D. Óxidos de ferro; E. Pirite framboidal; F. Romboedro de dolomite impregnado com hidrocarbonetos. 67
- Figura 4.19. Microfotografias da vitrinite (A a C) e inertinite (D a F) no afloramento B da Formação de Cribas..... 69

Figura 4.20. Microfotografias dos aspetos e histogramas de betumes solidos da Formação de Cribas.	71
Figura 4. 21. Microfotografias de zooclastos da Formação de Cribas.	72
Figura 4.22. Microfotografia da matéria mineral da Formação de Cribas.	72
Figura 4.23. Microfotografias da vitrinite (A a C) e da inertinite (D a F) da Formação de Atahoc.	74
Figura 4.24. Microfotografias de betumes sólidos (A e B) encontrados na amostra GA_49_573 da Formação de Atahoc; C. Histograma da reflectância dos betumes sólidos.....	75
Figura 4. 25. Microfotografias de zooclastos (A e B) encontrados na Formação de Atahoc; C. pirite framboidal; F. Óxidos de ferro.....	75
Figura 4.26. Histogramas da reflectância da vitrinite das amostras da Formação de Wailuli.	78
Figura 4. 27. Histogramas da reflectância de vitrinite na Formação de Aituto. A, Amostra FS2C do afloramento C; B. Amostra FS1D do afloramento D; C. Amostra FS3D do afloramento D; D. Amostra FS3E do afloramento E; E. Afloramento FS1H do afloramento H; F. Amostra FS2H do afloramento H; e G. Amostra GA_49_573.	80
Figura 4.28. Histogramas da reflectância da vitrinite das amostras na Formação de Cribas.	82
Figura 4.29. Histograma da reflectância da vitrinite na amostra AC_RH_WPT_217 da Formação de Atahoc.	82

Índice de tabelas

Tabela 1.1. Classificação ICCP/TSOP (2002) da MOD (Flores & Suárez-Ruiz, 2017).....	6
Tabela 2.1. Comparação das unidades estratigráficas propostas por Audley-Charles (1968) e Leme (1968)	15
Tabela 3.1. Referência das amostras, coordenadas dos afloramentos e atitude das estruturas identificadas.	27
Tabela 3.2. Etapas seguidas durante o processo de pré-polimento e polimento da superfície polida das amostras.	30
Tabela 4.1. Caracterização das amostras com a indicação das formações em que foram colhidas.	36
Tabela 4.1 (continuação) Caracterização das amostras com a indicação das formações em que foram colhidas.....	37
Tabela 4.2. Resultado de COT, St, RI das amostras estudadas.	49

Lista de abreviaturas

ASTM – American Society for Testing and Materials

C – Carbono

CaCO₃ – Calcite

COT – Carbono Orgânico Total

DGAOT – Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território.

FCUP – Faculdade de Ciência da Universidade do Porto

H – Hidrogénio

H/C – Razão atómica hidrogénio/carbono

HCl – Ácido clorídrico

ICCP – International Committee for Coal and Organic Petrology

LAFO - Laboratório de Palinofácies e Fácies Orgânica

MO – Matéria Orgânica

MOD – Matéria Orgânica Dispersa

N – Nitrogénio

O – Oxigénio

O/C - Razão atómica oxigénio/carbono

PO – Petrologia Orgânica

RI – Resíduo insolúvel

Rr – Reflectância da vitrinite

S – Enxofre

St – Enxofre total

TSOP - The Society for Organic Petrology

YAG – Yttrium Aluminium Garnet standard

Capítulo 1 - Introdução

1.1. Justificação do trabalho

Timor-Leste é um país jovem rico em hidrocarbonetos, sobretudo petróleo e gás natural que se encontra na zona de *onshore* e *offshore*. A economia do país depende do setor da exploração do petróleo no *offshore* do mar de Timor na fronteira marítima com a Austrália.

Os hidrocarbonetos de Timor-Leste têm atraído muitas empresas e geólogos internacionais desde o fim da ocupação de Portugal até à data. No entanto, o sistema petrolífero de Timor-Leste é desconhecido dos Timorenses.

Como Timorense tenho muito interesse em contribuir para o melhor conhecimento e desenvolvimento da geologia de Timor-Leste. Sobretudo, dedico o meu trabalho com a elaboração da dissertação de mestrado sobre os hidrocarbonetos do meu país, intitulado: Estudo petrográfico e geoquímico das sequências carbonatadas do anticlinal de Cribas no distrito de Manatuto, Timor-Leste.

As formações geológicas das zonas selecionadas para este estudo têm potencial para a geração de hidrocarbonetos, o que justifica a necessidade de conhecer o tipo e a concentração em matéria orgânica (MO) depositada e preservada nas rochas sedimentares destas sequências, assim como o grau de maturação atingindo durante a evolução diagenética e os processos de formação dos hidrocarbonetos que ocorrem naturalmente. Só o conhecimento profundo da MO e a sua caracterização permite conhecer e sobretudo gerir bem este recurso fundamental na economia de Timor-Leste.

Para esse estudo, pretende-se responder a algumas questões pertinentes:

- a) Qual a composição orgânica das sequências sedimentares consideradas como rochas-mãe?
- b) Qual a quantidade e tipo de MO destas sequências?
- c) Qual o grau de maturação da MO?
- d) Qual o ambiente sedimentar onde se depositaram estas sequências?

1.2. Objetivos

Neste contexto, as rochas das sequências sedimentares de Timor-Leste merecem a maior atenção neste estudo. Assim, o objetivo geral é a caracterização da MO presente nas sequências da Bacia de Cribas, através do estudo petrográfico e geoquímico da MO. Os objetivos específicos são:

- i. Caracterizar a MO, presente na sequência sedimentar da bacia em estudo;
- ii. Determinar a composição e classificar o tipo de cerogénio;
- iii. Determinar a fácies orgânica e o ambiente de deposição da MO;
- iv. Avaliar a maturação e compreender as estruturas geológicas associadas à génese dos hidrocarbonetos.

Com estes objetivos, espera-se que este trabalho possa contribuir para o conhecimento do potencial de geração em hidrocarbonetos, principalmente na zona de *onshore* da área estudada. Para além disso, este trabalho pretende, também, contribuir para o conhecimento da geologia do petróleo de Timor-Leste. Espera-se, ainda que seja uma referência valiosa para empresas e governos que desejem obter elementos relativos à prospeção do petróleo de Timor-Leste. Os dados foram obtidos nas amostras recolhidas no campo e analisadas nos laboratórios do DGAOT-FCUP e no Laboratório de Palinofácies e Fácies Orgânicas (LAFO) da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil.

1.3. Conceitos gerais

1.3.1. Definição da matéria orgânica

A matéria orgânica (MO) dispersa nos sedimentos e nas rochas sedimentares compreende todo o material composto por moléculas orgânicas na forma de monómeros ou polímeros, derivada direta ou indiretamente das partes orgânicas de organismos (Tissot & Welte, 1984). Esta foi sintetizada por organismos vivos, e posteriormente depositada e preservada nos sedimentos sob condições anaeróbias. Dependendo dos fenómenos geológicos ocorridos,

a matéria orgânica sedimentar pode transformar-se em compostos tais como hidrocarbonetos (Tissot & Welte, 1984). Os elementos químicos principais dos componentes orgânicos são o carbono (C), o hidrogénio (H), o oxigénio (O), o nitrogénio (N) e o enxofre (S).

1.3.2. Origem e classificação da matéria orgânica

A MO presente nos sedimentos e nas rochas sedimentares pode ser proveniente de vários organismos, como plantas ou animais, dependendo do ambiente deposicional em que é acumulada. Assim, a natureza da biomassa primária (algas, bactérias ou plantas terrestres) e grau de degradação bacteriana é um fator biológico importante que influencia o controlo de deposição da MO (Tissot & Welte, 1984).

Os três fatores importante para formar rochas com MO são: 1) produção, 2) acumulação, e 3) preservação.

A base da produção da MO é a fotossíntese. Na fotossíntese realiza-se o processo de conversão da energia solar em energia química. Basicamente há a transferência do hidrogénio (H) a partir de água para o dióxido de carbono (CO_2) para produzir MO, sob a forma de glicose, e oxigénio (Tissot & Welte, 1984).

O ambiente é um dos fatores muito importante para determinar o tipo e a origem da MO. Os ambientes onde ocorre a produção e preservação da MO compreendem: ambiente terrestre, ambiente de transição e ambiente aquático. A produção da MO pode ser feita através da decomposição dos materiais de origem biológica como plantas e animais tanto em ambiente continental como ambientes aquáticos. A principal fonte de MO aquática é o fitoplâncton, constituído por algas unicelulares.

Para além das condições geológicas que controlam a acumulação da MO nos sedimentos, a produção de biomassa (quantidade e qualidade) é, também, um fator importante na acumulação de MO assim como o processo de degradação e de transporte da MO. A acumulação da MO pode ser autóctone, quando é originada na coluna de água ou no sedimento em que esta é

incorporada, ou ser alóctone quando é estranha ao ambiente de deposição, sendo que, em ambos os casos, a energia hidrodinâmica no meio no qual ocorrem os processos de produção e/ou acumulação da MO e a granulometria e quantidade das partículas minerais devem ser adequados à sedimentação (Mendonça Filho, 2010).

A deposição de sedimentos de granulometria fina (fracção argila) dificulta o acesso do oxigénio dissolvido na água, favorecendo as condições de anoxia e diminuindo a possibilidade de desenvolvimento de bactérias aeróbicas (que promovem a decomposição da MO) aumentando, deste modo, a possibilidade de preservação da matéria orgânica. Assim, a matéria orgânica somente pode ser preservada e fossilizada em sedimentos subaquáticos.

A classificação dos componentes orgânicos é determinada por características tais como a sua origem, natureza e propriedades, para que a sua ocorrência em rochas sedimentares possa ser comparada qualitativamente e quantitativamente (Taylor et al., 1998). A MO pode ocorrer sob duas formas, a saber:

- I. MO concentrada que ocorre em grandes quantidades dando origem ao carvão. Normalmente ocorre em ambientes continentais;
- II. MO dispersa (MOD) correspondente à fracção orgânica que se deposita juntamente com os sedimentos. Normalmente MOD encontra-se em ambiente marinho e também em ambiente de transição com teores da matéria mineral mais elevados do que de MO.

Em Petrologia Orgânica, a MOD nos sedimentos inclui os macerais correspondentes à MO de origem vegetal, zoomorfos e produtos secundários. A quantidade relativa destes elementos é um fator determinante para a classificação do tipo de cerogénio presente na rocha. A classificação usada para os constituintes orgânicos da MOD (Tabela 1.1) é a Classificação do ICCP/TSOP (2002) sendo a nomenclatura usada a aprovada pelo ICCP – System 1994 (ICCP 1998, 2001; Pickel et al., 2017).

Os macerais são agrupados em três grupos: vitrinite, liptinite e inertinite (Tabela 1.1). Estes três grupos distinguem-se pela reflectância.

- I. O grupo da vitrinite compreende macerais de cor cinza e com reflectância entre a liptinite e a inertinite. Relativamente rica em oxigénio, comparando com outros grupos, resulta da gelificação de constituinte ligno-celulósicos (ICCP, 1998). Os macerais estão agrupados em subgrupos de macerais: Telovitrinite (Telinite e Colotelinite), Detrovitrinite (Vitrodetrinite e Colodetrinite) e Gelovitrinite (Corpogelinite e Gelinite).
- II. O grupo de liptinite é constituído por constituintes figurados que apresentam uma forma específica, por exemplo esporos, algas, cutículas, resinas, raízes e etc. (Pickel et al., 2017). Os macerais deste grupo apresentam reflectância baixa comparativamente com os do grupo da vitrinite e da inertinite e são ricos em hidrogénio. Os macerais deste grupo são: Cutinite, Suberinite, Resinite, Exsudatinite, Clorofilinite, Alginite, Liptodetrinite e Betuminite.
- III. Os macerais do grupo da inertinite apresentam maior reflectância do que os macerais dos outros grupos. Este grupo é relativamente rica em carbono e pobre em oxigénio e hidrogénio. Os macerais são derivados das estruturas vegetais ligno-celulósicos, fragmentos detríticos finos, geles, secreções celulares e restos de fungos (ICCP, 2001). Os macerais são: Fusinite, Semifusinite, Macrinite, Micrite, Funginite, Secretinite e Inertodetrinite.

Tabela 1.1. Classificação ICCP/TSOP (2002) da MOD (Flores & Suárez-Ruiz, 2017).

Grupos	Subgrupos	Macerais	Variedade
Vitrinite	Telovitrinite	Ttelnite	
		Colotelinite	
	Gelovitrinite	Gelinite	
		Corpogelinite	
	Detrovitrinite	Vitrodetrinite	
		Colodetrinite	
		Alginite	Telalginite Lamalginita
		Betuminite	
Liptinite		Liptodetrinite	
		Esporinite	
		Cutinite	
		Suberinite	
		Resinite	
		Exsudatinita	
		Clorofilinite	
Inertinite	(com estrutura celular)	Fusinite	
		Semifusinite	
		Funginite	
	(sem estrutura celular)	Macrinite	
		Micrinite	
		Secretinite	
	(fragmentos)	Inertodetrinite	
Zoomorfos	Escolecodontes		
	Graptólitos		
	Quitinozóários		
	Foraminíferos		
	Hidrozoários		
Produtos secundários	Betumes sólidos		
	Pirobetumes		
	Óleos		

A classificação da MOD inclui, ainda, compostos orgânicos de natureza animal, designados zooclastos ou zoomorfos. Designam-se por zoomorfos quando é possível identificar os animais (por exemplo, *Graptólitos*, *Hidrozoários*, *Quitinozoários*, *Foraminíferos*, etc). Os zooclastos correspondem a restos de animais, aos quais não é possível identificar o tipo de animal a que corresponde.

Para além dos compostos orgânicos acima referidos, ocorrem, ainda, os produtos secundários não geneticamente associados à MO autóctone, sendo posteriores, ocupando, normalmente espaços vazios da facção inorgânica. Esses produtos apresentam a forma dos espaços vazios que ocupam na matéria mineral. A sua reflectância aumenta com o aumento da maturação térmica. Os produtos secundários incluem: betumes sólidos, pirobetumes e óleos.

1.3.3. Cerogénio

A MO original é transformada em cerogénio por uma variedade de reações geoquímicas que ocorrem durante a diagénese e afundimento das sequências com MO (Mendonça Filho, 2010). O cerogénio compreende a MO sedimentar insolúvel em solventes orgânicos (Tissot & Welte, 1984).

Em petrologia e geoquímica orgânicas, são definidos três tipos de cerogénio: tipo I, tipo II e tipo III (Figura 1.1). Esses tipos foram classificados com base na análise elementar da MO presente nos sedimentos e rochas sedimentares.

O tipo de cerogénio é definido com base nas razões atómicas hidrogénio/carbono (H/C) e oxigénio/carbono (O/C) através do diagrama de Van Krevelen (Figura 1.1).

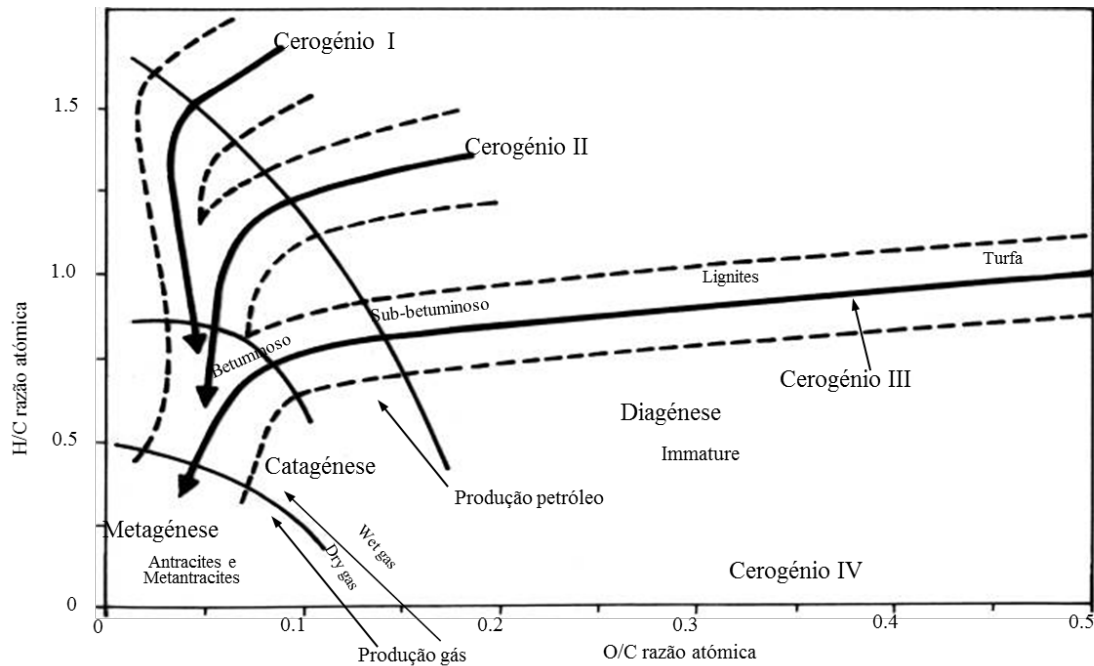


Figura 1.1. Diagrama de Van Krevelen e tipo de cerogénio (Adotado de Tissot & Welte, 1984).

- i. O cerogénio tipo I refere-se aos compostos orgânicos que apresentam a razão atômica de H/C maior (1,5 ou mais) do que O/C (0,1 ou menos). A MO apresenta estrutura química maioritariamente alifática. O tipo de MO que dá origem a este tipo de cerogénio é algar lacustre. Este tipo de cerogénio tem um elevado potencial para gerar petróleo.
- ii. O cerogénio tipo II apresenta uma composição intermédia, apresentando valores da razão atômica de H/C mais elevados do que O/C. O material orgânico é de origem continental rico em lípidos, tal como esporos e pólenes, e algar marinho sendo o ambiente de deposição geralmente marinho (fitoplâncton, zooplâncton e microrganismos/bactérias). Este tipo de cerogénio encontra-se presente na grande maioria das rochas mãe do petróleo.
- iii. O cerogénio tipo III apresenta valores baixos para a razão atômica de H/C (normalmente menos de 1,0) e alta para a razão atômica de O/C (maior do que 0,2). Esse tipo de cerogénio é rico em compostos orgânicos aromáticos derivados de plantas

superiores. Tem um baixo potencial para gerar petróleo em relação aos tipos anteriores. No entanto as rochas com este tipo de cerogénio são convenientes como fonte de gás, desde que apresente maturação suficiente.

Para além dos três tipos de cerogénio indicados, Tissot & Welte (1984) referem um tipo de cerogénio que apresenta um valor muito baixo para a razão atómica H/C e elevado para O/C não gerando nenhuns hidrocarbonetos. Contudo, é considerado como um cerogénio residual, designado por cerogénio tipo IV. Esse tipo de cerogénio tem um potencial nulo para gerar hidrocarbonetos, quer seja petróleo ou gás e é formado, essencialmente, por MO remobilizada ou altamente oxidada derivada de ambientes marinhos ou continentais.

1.3.4. Maturação térmica

Após a deposição da MO na bacia sedimentar os processos físico-químicos começam a intervir na sua evolução. As transformações físico-químicas da MO durante a história geológica das bacias sedimentares não podem ser consideradas como um processo isolado. Estas transformações são controladas pelos mesmos fatores que determinam também a variação de composição para atingir a maturação: factores ecológicos numa fase precoce, em seguida, factores termodinâmicos, nomeadamente temperatura e pressão (Tissot & Welte, 1984).

Para além disso, a presença de estruturas das rochas e abundância da própria MO pode resultar num comportamento diferente com a fase mineral pouco depois da deposição, influenciar a composição e a distribuição das fases de fluídos orgânicos em profundidade.

O fator mais importante para maturação da MO é a temperatura. O aumento de temperatura conforme a profundidade dependerá do gradiente geotérmico, que varia de bacia para bacia. O valor médio é de aproximadamente 3°C por cada 100 m de profundidade (Jahn et al., 2012).

Consideramos três fases na evolução da maturação na MO a partir do tempo de deposição para o início do metamorfismo: Diagenese, Catagenese e Metagenese (Figura 1.2).

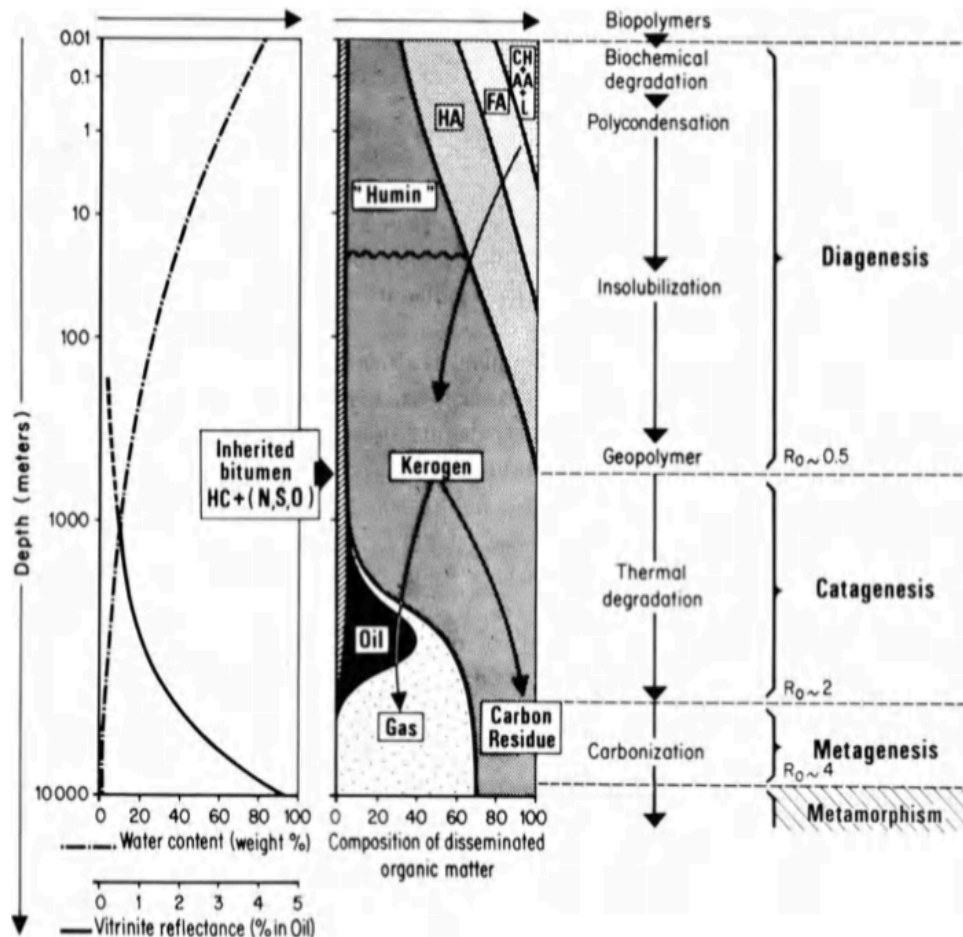


Figura 1.2. Fases da maturação térmica da MO (Adotado de Tissot & Welte, 1984).

Diagenese

A maior parte dos restos de MO original é metabolizado e principalmente transformado dentro do ambiente de deposição no início de diagenese (Tyson, 1995). No início da diagenese o aumento da temperatura e da pressão é pequeno, e as transformações ocorrem em condições essencialmente biogeoquímicas (Tissot & Welte, 1984). A maturação nesta fase é controlada por: (1) degradação biológica na interface sedimentos e água; (2) interação orgânica-mineral; e (3) condensação de compostos orgânicos.

Os fatores que influenciam a diagénese da MO nos sedimentos são os seguintes (Larsen & Chilingar, 1979):

- Geográficos (por exemplo, clima, química da água de superfície);
- Tectónicos (por exemplo, taxa de erosão e acumulação, subsidência);
- Posição geomorfológica (por exemplo, condições hidrodinâmicas);
- Taxa de deposição dos sedimentos;
- Granulometria do sedimento (por exemplo, percentagem de argila MO alterando o teor de líquidos intersticiais).

Segundo Tissot & Welte (1984), um dos principais agentes de transformação nesta fase é a atividade microbiana. Polímeros ou "biopolímeros" (proteínas, hidratos de carbono) são destruídos pela atividade microbiana durante a sedimentação no início da diagénese. Em seguida, os seus constituintes transformam-se progressivamente em novas estruturas, "geopolímeros", produzindo o cerogénio.

Os hidrocarbonetos formados durante a diagénese são o metano diagenético. Em termos de exploração de petróleo, a MO das rochas que estão nesta fase de evolução são consideradas como imaturas. Considera-se que a diminuição na relação O/C é mais rápida do que a H/C (Biju-Duval, 2002). A refletância da vitrinite nesta fase é inferior a 0,5% (Figura 1.2).

Catagénese

Nesta fase a temperatura pode variar de 50 a 150°C e a pressão geostática, devido a sobrecarrega, pode variar de 300 a 1000-1500 bares quando a profundidade é de cerca de 500 m a 4000 m, de acordo com os gradientes térmicos das bacias sedimentares (Biju-Duval, 2002).

A MO experimenta grandes mudanças, através da evolução progressiva do cerogénio produzindo numa primeira fase (chamada de janela do petróleo) petróleo líquido; seguidamente gera-se "gás húmido" e condensados

acompanhados por quantidades significativas de metano. Na janela do petróleo a refletância de vitrinite varia entre 0,5 a 1,3% (Figura 1.2).

Metagénese

Esta fase é alcançada a grande profundidade, onde a MO produz somente metano e um resíduo carbonoso, e onde a MO começa a desenvolver alguma ordenação. A metagénese ocorre em zonas com um gradiente geotérmico elevado. A eliminação do H é lenta e o cerogénio residual é, geralmente, constituído por C. Em casos extremos, o teor de C pode atingir 91% em massa e a razão atómica H/C ser de apenas 0,4. Em termos de exploração de petróleo, a fase de metagénese está inteiramente situada na zona de gás seco (Tissot & Welte, 1984). A reflectância da vitrinite na “janela de geração de gás” ocorre entre 1,3 a 4,0%, em que o limite entre gás húmido e seco é o 2,0% Rr.

Do ponto de vista geológico, Timor-Leste está situado numa região complexa, resultando da colisão de placa Australiana com o arco da Banda. O território é designado de pequena sonda, fazendo parte do designado arco exterior de Banda, de natureza não vulcânica. Segundo alguns autores as unidades autóctones da ilha correspondem ao bordo noroeste da plataforma continental Australiana (Hall, 2011).

A definição das unidades estratigráficas tem sido alvo de sucessivos estudos e revisões fruto de trabalhos de geólogos de diversas nacionalidades (Nogueira, 2010 e referências incluídas). Um dos aspectos importantes para a compreensão da geologia de Timor-Leste foi o reconhecimento da existência de unidades claramente alóctones (Nogueira, 2010). Existem trabalhos de fundo baseados em cartografia relativamente detalhada do território, sobretudo nos anos 60, nomeadamente os trabalhos de Audley-Charles (1968) e Leme (1968), que realizaram o essencial da cartografia do território, publicando a cartografia à escala 1:250.000 onde foram definidas as principais unidades estratigráficas (Carvalho & Lisboa, 2003; Nogueira 2010).

Na figura 2.2 mostra-se a cartografia geológica de Timor-Leste e na tabela 2.1 apresentam-se as designações das unidades estratigráficas e as idades definidas por Audley-Charles (1968) e Leme (1968), e a respectiva comparação proposta por Nogueira (2010).

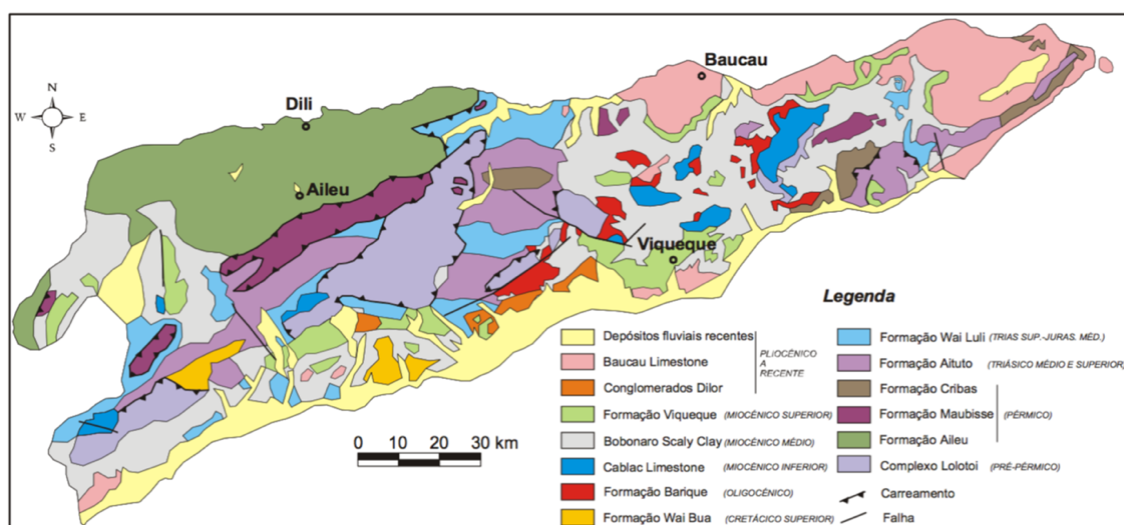


Figura 2.2. Carta geológica de Timor-Leste. (Audley-Charles, 1968 in Carvalho & Lisboa, 2003).

Tabela 2.1. Comparação das unidades estratigráficas propostas por Audley-Charles (1968) e Leme (1968).

Audley-Charles (1968)			Leme (1968)		
Cod.	Formação	Idade	Cod.	Formação	Idade
Sistema autóctone					
			7.1.1	Formação de Lolotoi	Pré-pérmico
1	Formação de Atahoc Formação de Cribas	Pérmico	7.1.2	Série de Cribas	Pérmico
2	Formação Aituto Membro Tallibelis	Triásico	7.1.3	Série do Triásico-Jurássico (antiga Série de Mota Bui)	Triásico-Jurássico
3	Formação Wailuli (Ailuli)	Jurássico	7.1.4	Maciços calcários de Tutuala	Triásico superior
4	Formação Wai Bua Calcário de Borolaro Formação Seical	Cretácico	7.1.5	Formação de Bagueia	Jurássico?
			7.1.6	Cretácico	Cretácico
5	Calcários de Dartolú	Eocénico	7.1.7	Formação de Dartolú (antiga Série de Same)	Eocénico
6	Formação de Barique	Oligocénico	7.1.8	Rochas eruptivas de Barique	Oligocénico?
7	Calcários de Cablac Calcários de Aliambata	Miocénico Inferior	7.1.9	Calcários de fato	Miocénico inferior
8	Formação de Viqueque Calcários de Lari guti	Miocénico superior	7.1.10	Complexo argiloso	Miocénico superior
9	Conglomerado de Dilor Seketo Block Clay	Pliocénico	7.1.11	Série de Viqueque	Plio-Plistocénico
10	Calcários de Baucau Calcário de Poros Formação de Suai Gravels de Ainaro	Pós-pliocénico	7.1.12	Rochas eruptivas pós-pliocénicas	Pós-pliocénico
			7.1.13	Recifes de coral emersos	
			7.1.14	Calcários lacustres de Pórus	
			7.1.15	Terraços fluviais	
			7.1.16	Aluviões recentes	
Sistema alóctone					
1	Complexo de Lolotoi	Pré-Pérmico			
2	Formação de Aileu Formação de Maubisse	Pérmico	7.2.1	Série metamórfica de Díli	Pérmico inferior?
			7.2.2	Série de Maubisse	Pérmico superior
3	Calcário de Borolaro	Cretácico superior			
4	Argilas de Bobonaro	Miocénico médio			

A área de estudo localiza-se no centro da ilha de Timor-Leste, no Distrito de Manatuto. Este distrito situa-se entre 8.03°- 9.06° da latitude sul e 125.45°- 126.10 de longitude este, com uma área de 1785 km² (Caldeira et al., 2013).

Em termos estruturais, vários autores (Audley-Charles, 1968; Leme, 1968) interpretaram o Anticlinal de Cribas (Figura 2.3) como uma das estruturas principais de Timor-Leste. Segundo Dias et al. (2013) trata-se de uma dobra aberta (ambos os flancos mergulham cerca de 25°), com plano axial subvertical e eixo subhorizontal com duas terminações periclinais. Os mesmos autores (Dias et al., 2013) referem que em ambos os flancos são frequentes dobras de segunda ordem com geometria compatível com o anticlinal de primeira ordem de Cribas.

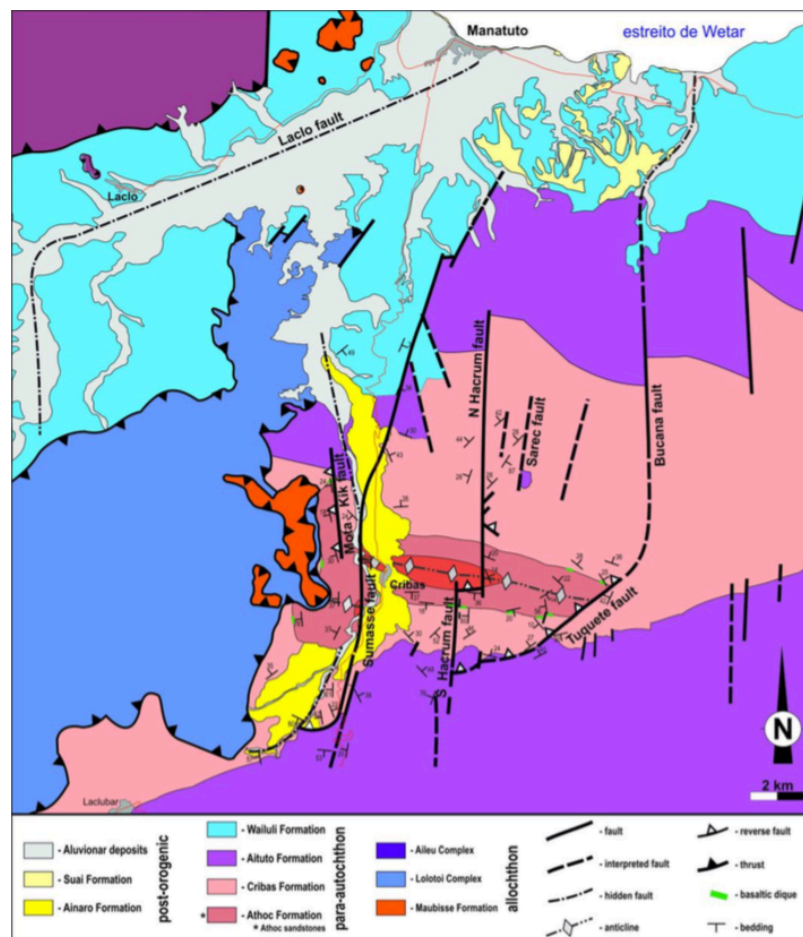


Figura 2. 3. Mapa geológico-estrutural da área de Cribas (SERN, 2012 em Lopes et al., 2012).

Em termos geológicos esta área inclui uma sequência sedimentar do Pérmico-Jurássico tal como proposto por Charlton, (2002) na figura 2.4.

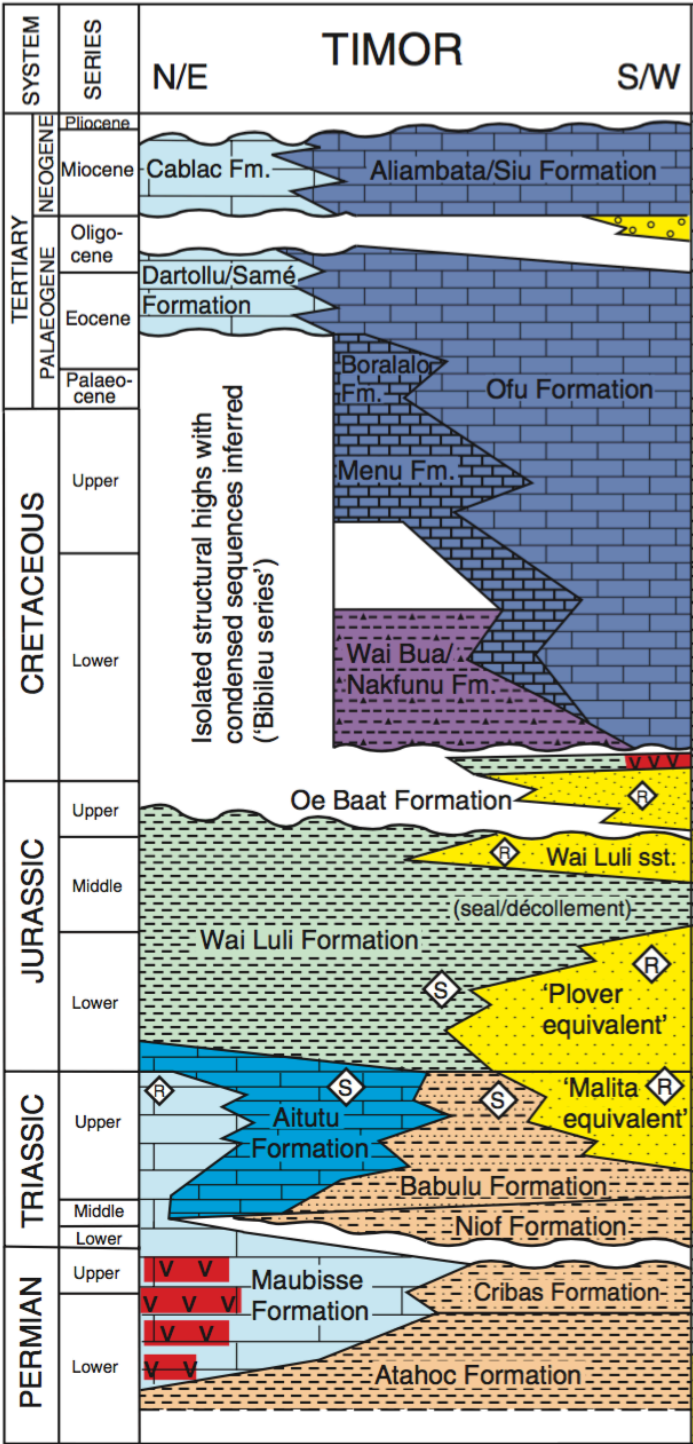


Figura 2. 4. Sequência estratigráfica do Pérmico-Jurássico de Timor-Leste (Charlton, 2002).

A sequência do Pérmico inclui (Figura 2.4) uma sequência sedimentar vulcano-carbonatada (Formação de Maubisse) e uma sequência clástica (Formações de Atahoc e Cribas) na qual as rochas vulcânicas são menos evidentes (Charlton et al., 2002). De acordo com os mesmos autores, os carbonatos da Formação de Maubisse foram depositados em horsts e construções vulcânicas, sendo a sequência clástica das Formações de Atahoc e Cribas depositadas em grabens. Os sedimentos clásticos são predominantemente finos, provenientes de uma fonte siliciclástica distante, intercalados com sedimentos provenientes de rochas vulcânicas e carbonatos dos horsts adjacentes.

Por sua vez a Formação de Aituto do Triássico inclui uma sequência carbonatada com níveis pelíticos negros depositados numa plataforma marinha (Charlton et al., 2009), sendo a Formação do Wailuli (Jurássico) uma sequência pelítica espessa (Spencer et al., 2016).

As principais características da sequência estratigráfica do Pérmico-Jurássico de Timor-Leste (Figura 2.4) são as seguintes:

2.1. Formação de Maubisse

Esta formação foi definida por Audley-Charles em 1968 (Charlton et al., 2002) em Timor-Leste. Esta formação consiste de três fácies: calcários e calcilutitos, basaltos e rochas vulcanosedimentares. A fácies calcária corresponde a calcarenitos mal calibrados com grãos de bioclastos, pellets e uma componente detrítica que inclui fragmentos de rocha vulcânica, com matriz micrítica. A matriz apresenta frequentemente esparitização e óxidos de ferro que conferem a estes carbonatos uma cor vermelha característica. Esta fácies destaca-se na paisagem pela resistência à meteorização. A continuidade lateral desta fácies é muito limitada (Charlton et al., 2002).

A maior parte da Formação de Maubisse consiste em basaltos, com algumas rochas intrusivas máficas, sienitos e tufos. Tal como a fácies calcária, a sua continuidade lateral é limitada (Charlton et al., 2002).

A fácies vulcanosedimentar é constituída por tufos de cor verde a cinzenta, intercalados quer nos basaltos quer nos calcarenitos (Charlton et al., 2002).

2.2. Formação de Atahoc

Esta formação foi também definida por Audley-Charles em 1968 (Charlton *et al.*, 2002) no anticlinal de Cribas, estando localizada na zona central norte de Timor-Leste. Esta formação constitui a base da sequência e está em concordância com a Formação de Cribas.

A Formação de Atahoc é de idade Pérmica, do Sakmario, baseada numa fauna de Amonóides comparados com as camadas de Somohole de Timor-Oeste.

Esta unidade é uma série monótona constituída principalmente por argilitos negros finamente laminados com intercalações de arenitos quártzicos maciços de grão fino e rochas vulcânicas (Spencer et al., 2016). A parte inferior é constituída por arenitos quártzicos maciços cinzentos com algumas intercalações de argilitos negros, sendo sobrepostos por argilitos e siltitos com numerosos nódulos calcários e argilo-ferrosos e níveis de calcário. Os calcários são de cor bege, cinzentos ou vermelhos com fósseis, nomeadamente crinóides, raras trilobites, cefalópodes, corais e briozoários (Charlton et al., 2002).

2.3. Formação de Cribas

Esta formação datada do Pérmico, sobrepõe-se à Formação de Atahoc, sendo o limite colocado arbitrariamente no topo de um horizonte basáltico, mas marcado paleontologicamente pelo primeiro aparecimento de bivalves de *Atomodesma* que são característicos desta formação e pelo desaparecimento das trilobites, raras, mas características da Formação de Atahoc (Audley-Charles, 1968 *in* Charlton et al., 2002).

Esta formação é constituída maioritariamente por xisto com matéria orgânica na base e intercalada com arenitos no topo. Os xistos com matéria

orgânica apresentam cor negra e cinzento-azulado, siltitos micácios e arenitos quártzicos de grão fino. Níveis de calcários são raros na base da formação, mas no topo os biomicrítos e calcilutitos são mais comuns (Charlton et al., 2002).

A ocorrência de nódulos calcários nos xistos negros, ocasionalmente piríticos, foi considerada indicativa de condições anóxicas localmente estagnadas.

Hunter (1993, *in* Charlton et al., 2002) interpretou as camadas de xistos e de arenitos desta formação como tendo sido depositados na parte distal de um complexo leque submarino que foi progredindo para oceano aberto. A imaturidade dos grãos e a textura dos arenitos indicam uma fonte proximal e um tempo de residência na plataforma limitado antes da re-deposição na bacia por correntes de turbidez. Os grãos fosfatados encontrados dentro do arenito também suportam a interpretação da deposição final nas condições de água salgada, seguida da re-deposição. O predomínio dos arenitos na parte superior desta formação está associado ao enchimento da bacia. A presença de nódulos de ferro é também indicativa de condições anóxicas (Charlton et al., 2002).

2.4. Formação de Aituto

Esta formação, do Triásico Superior, compreende uma sequência rítmica com a alternância de bancadas pouco espessas de calcários rosa, argilitos e xistos argilosos, com predomínio da componente carbonatada. A base desta formação é comumente representada por 50 metros de sedimentos de granulometria muito fina de calcilutitos com estrutura bem desenvolvida. O topo desta formação está concordante com a Formação de Wailuli (Charlton et al., 2009).

Esta formação depositou-se num ambiente marinho, tal como indicado pela micro- e macrofauna. A presença de calcilutite e xistos intercalados sugere a ausência de correntes fortes. As calcilutitos são provavelmente de origem inorgânica e precipitados na água do mar por plâncton como carbonato de cálcio (Charlton et al., 2009; United Nations, 2003).

2.5. Formação de Wailuli

A Formação de Wailuli, de idade Triássico Superior-Jurássico, corresponde a uma espessa sequência de argilitos com intercalações de margas laminadas, calcilutitos, argilitos micácios e arenitos quártzicos. Para o topo da formação ocorrem conglomerados e argilitos vermelhos (Spencer et al., 2016). Esta sequência depositou-se num ambiente marinho raso como indica a presença de pisólitos com algas, oólitos e bioclastos. Localmente, o ambiente de deposição pode ter sido altamente salino (Charlton et al., 2009; United Nations, 2003).

A Formação de Wailuli assenta em conformidade na Formação de Aitutu (Charlton et al., 2009).

Capítulo 3 - Amostragem e metodologias de estudo

Neste capítulo descreve-se o método como foi realizada a amostragem assim como a metodologia de preparação das amostras para as análises geoquímica e petrográfica.

3.1. Amostragem

A recolha das amostras realizou-se no mês de agosto de 2016, aproveitando as férias de verão e a estadia em Timor.

Atualmente, ainda não existe mapa geológico com escala de pormenor da região em estudo. Assim, o trabalho de campo foi realizado com base em informação obtida no Google Earth e a informação fornecida pelo Professor Pedro Nogueira, com conhecimento sobre esse local.

As amostras foram recolhidas ao longo da estrada que liga Manatuto Vila e Laclubar (Figura 3.1). O acesso aos afloramentos é difícil pela má condição da estrada, com muitos escorregamentos. Os afloramentos onde foram colhidas as amostras foram referenciados através das coordenadas geográficas recolhidas nos respetivos locais.



Figura 3.1. Localização da área do estudo, visualização do Google Earth.

Os equipamentos que foram utilizadas na amostragem (Figura 3.2) foram o martelo de geólogo (usado para colher as amostras), sacos para acondicionamento e referência das amostras, marcador para referenciar os sacos onde foram acondicionadas as amostras, GPS para tirar as coordenadas de cada afloramento e posicionar a sua localização, livro do campo e lápis ou caneta para anotar as informações dos afloramentos, bússola para medir as estruturas identificadas nos afloramentos e, ainda, máquina fotografia para registar os locais de amostragem. Para a recolha das amostras foi usado transporte privado, uma mota que permite o melhor acesso aos afloramentos.



Figura 3.2. Alguns equipamentos geológicos utilizados no campo.

Antes de se iniciar o trabalho de campo, foram recolhidas as informações geológicas disponíveis do local em publicações anteriores. As informações encontram-se maioritariamente em artigos, pouco livros e uma dissertação.

Em cada afloramento foram colhidas duas ou três amostras referenciadas tal como mencionado anteriormente. A localização dos afloramentos está representada na figura 3.3. Foram colhidas um total de 28 amostras, selecionadas tendo em conta a litologia e a cor. A cor pode dar informações úteis sobre a riqueza em matéria orgânica de uma rocha sedimentar visto que o aumento do teor em matéria orgânica está associado a rochas de cor cinzenta a negra. Para além disso, foram também recolhidas amostras de carbonatos, que podem ser importantes no estudo das rochas reservatório.

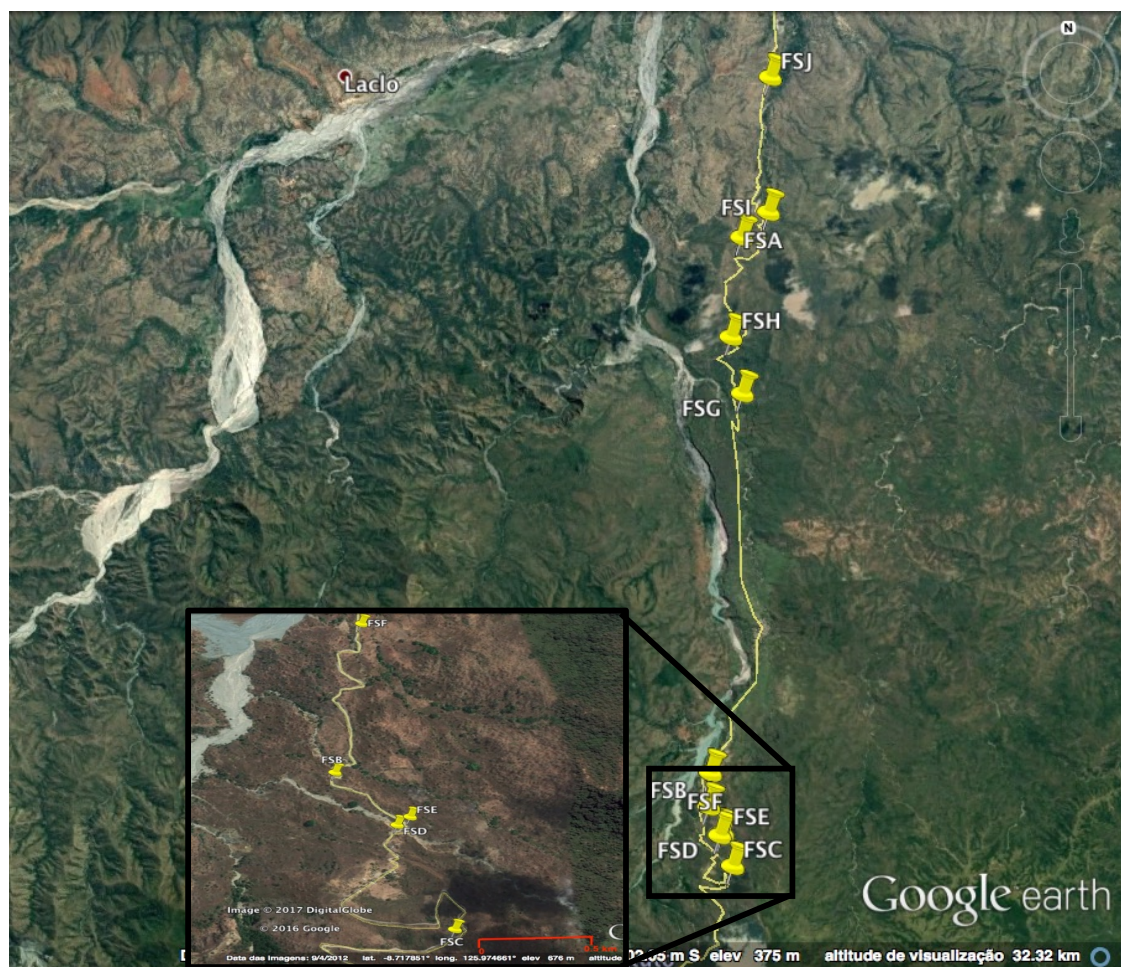


Figura 3.3. Referência e localização das amostras recolhidas no campo.

Cada uma das amostras colhidas nos afloramentos foi colocada num saco devidamente identificado. A identificação das amostras foi feita seguindo as indicações sugeridas por Coe et al. (2010). Assim, as amostras foram denominadas do seguinte modo: $FSn\alpha$, onde FS – nome e apelido do autor (FS - Francisco Silva); n – número da amostra; e, α - letra que indica o afloramento.

Por exemplo, *FS1A* indica: *FS* o nome do autor; *1* número da amostra e *A* do afloramento.

Para o estudo da MO através de métodos petrográficos e geoquímicos, foram recolhidas um total de 28 amostras nos 10 afloramentos. A distância entre os 10 afloramentos varia entre métricas e quilométricas. Pela análise da carta geológica, esses afloramentos pertencem à Formação de Wailuli, Formação de Aituto e base da Formação de Cribas.

Em todos os afloramentos foram tiradas as coordenadas geográficas por GPS e fotos para ilustrar os aspectos mais característicos. Foram, ainda, medidas as estruturas geológicas visíveis, como a atitude da estratificação. Essa informação encontra-se na tabela 3.1.

Para além destas amostras, foram, ainda, estudadas 4 amostras existentes nos arquivos do Departamento de Geociências da Universidade de Évora e cedidas pelo Professor Pedro Nogueira. As amostras e as formações onde foram colhidas são as seguintes:

- AQ 04 – Formação do Wailuli
- GA49 – Formação do Aituto
- AC RH wpt034 – Formação de Cribas
- AC RH wpt217 – Formação de Atahoc

Tabela 3.1. Referência das amostras, coordenadas dos afloramentos e atitude das estruturas identificadas.

Afloramento	Nº Amostra	Coordenadas	Estruturas	Observação
A	FS1A	-8.59196 - lon 125.99679 - lat	So = N070°; 22°NW	Estratificação e atitude de bancada de calcário
	FS2A			
B	FS1B	-8.71740 - lon 125.97607 - lat	So = N100°; 50°SW	-
	FS2B			
	FS4B			
C	FS1C	-8.72668 - lon 125.98061 - lat	So = N160°; 30°SW	Unidades negras com fósseis
	FS2C			
	FS3C			
D	FS1D	-8.72067 - lon 125.97861 - lat	-	-
	FS2D			
	FS3D			
E	FS1E	-8.72020 - lon 125.97920 - lat	So = N180°; 48°W	-
	FS2E			
	FS3E			
F	FS1F	-8.70810 - lon 125.97777 - lat	-	-
	FS2F			
G	FS1G	-8.62774 - lon 125.98919 - lat	So = N110°; 32°NE	-
	FS2G			
	FS3G			
H	FS1H	-8.61781 -lon 125.98728 - lat	-	-
	FS2H			
	FS3H			
I	FS1I	-8.59705 - lon 125.99066 - lat	-	-
	FS2I			
	FS3I			
J	FS1J	-8.56340 - lon 125.99892 - lat	So = N132°; 38°NE	-
	FS2J			
	FS3J			

3.2. Preparação das amostras para estudo petrográfico e geoquímico

No laboratório foram retirados cerca de 200 gramas de cada amostra para análise geoquímica que incluiu a determinação do Carbono Orgânico Total (COT), Enxofre total (St) e o Resíduo Insolúvel (RI). Os dados da análise geoquímica foram obtidos no Laboratório de Palinofácies e Fácies Orgânicas (LAFO) da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil.

A preparação das amostras para o estudo petrográfico foi realizada no Laboratório de Preparação de Amostras do Departamento de Geociência, Ambiente e Ordenamento do Território da Universidade do Porto (DGAOT-FCUP), que dispõe das facilidades para a execução das superfícies polidas para observação em microscopia de luz refletida no Laboratório de Petrografia Orgânica do mesmo departamento.

A preparação das amostras seguiu as indicações da norma ISO 7404-2 (2009). Assim, as amostras foram moídas para reduzir a granulometria de acordo com o especificado na norma de preparação das amostras. O processo de moagem (Fig. 3.4) teve início com moagem a uma granulometria de cerca de 20 a 10mm posteriormente a uma granulometria inferior a 1mm recorrendo a um almofariz. Entre a moagem de cada uma das amostras procedeu-se à limpeza cuidadosa de todos os equipamentos de moagem com álcool (Figura 3.4A). Este procedimento garante a não contaminação das amostras.

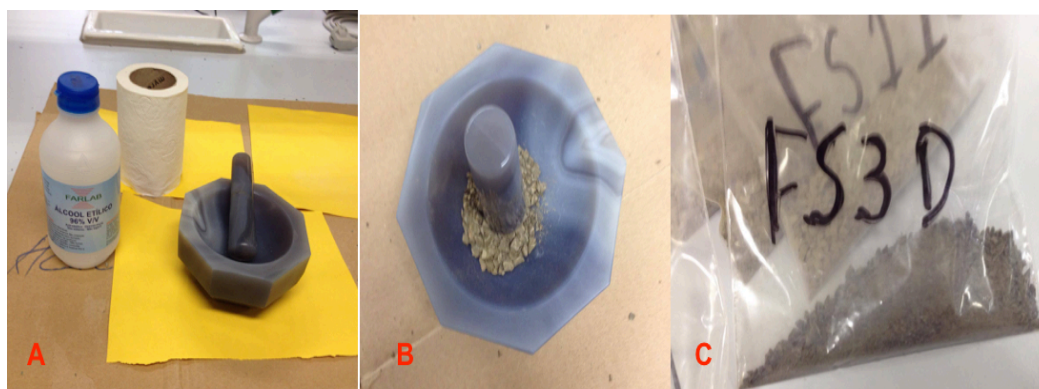


Figura 3.4. Moagem das amostras. A) utensílios de moagem e limpeza; B) moagem à mão; C) amostras moídas a 1mm devidamente acondicionadas e etiquetadas.

Depois da moagem das amostras à granulometria requerida pela norma ISO 7404-2 (2009), procedeu-se à preparação dos blocos polidos para análise petrográfica seguindo o mencionado na mesma norma. Assim, cerca de 5g de sedimento foi colocado num molde de plástico devidamente identificado com a designação da amostra. Posteriormente, preparou-se uma mistura de resina epóxi (*epofix*) com um endurecedor (*epofix hardener*) na proporção de 25 para 3 em volume, respetivamente, que foi bem homogeneizada. Esta mistura foi adicionada aos sedimentos previamente colocados nos moldes (Figura 3.5), e corresponde ao meio aglutinante. Após este procedimento, deixa-se secar durante 24 horas. Na figura 3.5 mostra-se as 28 amostras já preparadas e em processo de secagem. Após a secagem, as amostras são retiradas do molde de plástico, seguindo-se o processo de marcação da amostra recorrendo a um gravador mecânico com ponta diamantada. As amostras estão prontas para se proceder ao polimento.



Figura 3.5. Preparação dos blocos para polimento de uma superfície.

A preparação das superfícies polidas envolve o processo de pré-polimento e posteriormente polimento recorrendo a equipamento de polimento (Planopol 2, Figura 3.6A), abrasivos e lubrificantes.

No pré-polimento pretende-se obter uma superfície uniforme e plana obtida recorrendo a quatro tipos diferentes de lixas (carbeto de silício), de granulometria sucessivamente mais fina (240, 500, 1200 e 4000 mesh), assentes num prato giratório, usando água como lubrificante (Tabela 3.2).

Tabela 3.2. Etapas seguidas durante o processo de pré-polimento e polimento da superfície polida das amostras.

Etapa	Lixa (mesh)/panos	Abrasivo	Rotação (rpm)
1 ^a	240	Água	300
2 ^a	500	Água	300
3 ^a	1200	Água	300
4 ^a	4000	Água	300
5 ^a	Texmet	Alumina 0,3µm	300
6 ^a	Mastertex	Sílica coloidal 0,1µm	300

O polimento tem como objectivo obter uma superfície polida isenta de riscos e de relevo. Esta etapa foi realizada recorrendo a uma máquina de polimento Ecomet 3 (Figura 3.6B) com panos específicos para o efeito e alumina e sílica coloidal como líquidos abrasivos (Tabela 3.2). Por último, todas as preparações foram lavadas com água e ar comprimido, minimizando restos de produtos de polimento. Os blocos polidos ficaram assim prontos para serem analisados, tendo sido colocados num exsiccador (Figura 3.7) durante 24 horas para eliminação da água usada durante o polimento e limpeza da superfície polida.

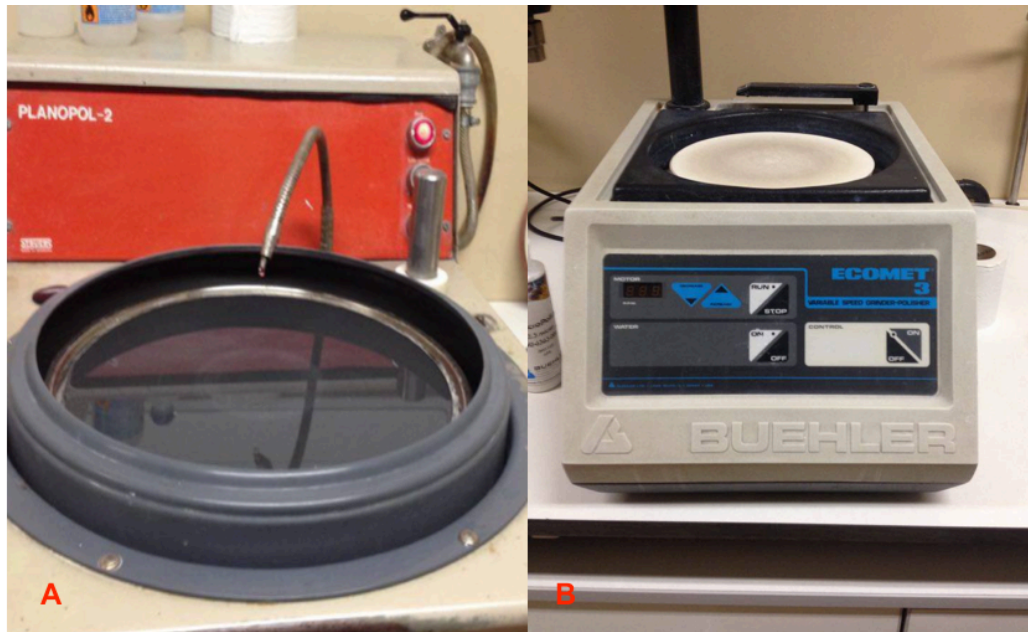


Figura 3.6. A) Máquina de pré-polimento e B) Máquina de polimento.



Figura 3.7. Exsicador para secar as amostras.

3.3. Análise do COT, St e RI

O procedimento usado para a análise do COT, St e RI incluiu a fragmentação das amostras a uma granulometria de aproximadamente 2 mm, para em seguida foram colocadas durante dois dias numa estufa à temperatura de 50° C. Após terem sido retiradas da estufa, pulverizou-se cerca de 1 grama de sedimento de cada amostra, num almofariz de ágata. Seguidamente pesaram-se 0,26 gramas num porta-amostra de porcelana filtrante, ao qual foi adicionado ácido clorídrico (HCl) a 50% de volume. Esta mistura esteve em repouso durante 24 horas, para que toda a fração carbonatada fosse eliminada. Terminada esta etapa, cada amostra foi lavada durante uma hora com água destilada quente (100°C), para eliminar os cloretos, e posteriormente neutralizada com água destilada à temperatura ambiente. O excesso de água foi descartado, tendo sido as amostras levadas à estufa durante aproximadamente 3 horas, para uma fase de secagem. Terminada a preparação, procedeu-se ao registo da massa de cada porta-amostra.

Na análise, o COT e o St foram quantificados simultaneamente por um analisador LECO® SC-144DR. Este equipamento possui um forno em atmosfera de oxigénio (superseco) à temperatura de 1350°C, que por reações de oxi-redução leva à combustão total dos elementos. Cada porta-amostra foi introduzido no forno, obtendo-se o registo das concentrações dos gases carbono (CO₂) e enxofre (SO₂) relativo à amostra, em percentagem de massa. Todas as análises foram efetuadas em duplicado com uma exatidão de 99%.

O RI corresponde à fração da amostra que não foi eliminada durante o tratamento ácido, pelo que é um parâmetro calculado após a análise das amostras. Pressupondo que os carbonatos foram totalmente eliminados devido à acidificação, foi calculado usando a seguinte fórmula:

$$RI (\%) = (PI / PA) \times 100$$

Onde:

PI - massa do resíduo insolúvel (massa da amostra descarbonatada);

PA - massa da amostra inicial.

3.4. Análise petrográfica

As observações petrográficas foram realizadas em luz branca refletida e luz azul incidente (fluorescente) num microscópio Leica DM4000, equipado com um sistema Discus-Fossil (Figura 3.8), usando uma ocular de 10x e uma objetiva 50x em imersão em óleo. A reflectância das partículas orgânicas (vitritite e betumes sólidos) foi medida de acordo com o procedimento descrito na norma ASTM D7708-14. Os padrões de calibração do equipamento foram ajustados aos valores de reflectância esperados (YAG - Yttrium-Aluminium-Garnet=0,905%) e um vidro ótico negro para calibração do zero. Como referido anteriormente, a MOD foi classificada de acordo com a classificação ICCP/TSOP (ICCP/TSOP, 2002; Tabela 1.1), tendo sido usada a nomenclatura do ICCP – System 1994 - para os constituintes orgânicos (ICCP 1998, 2001; Pickel et al., 2017).

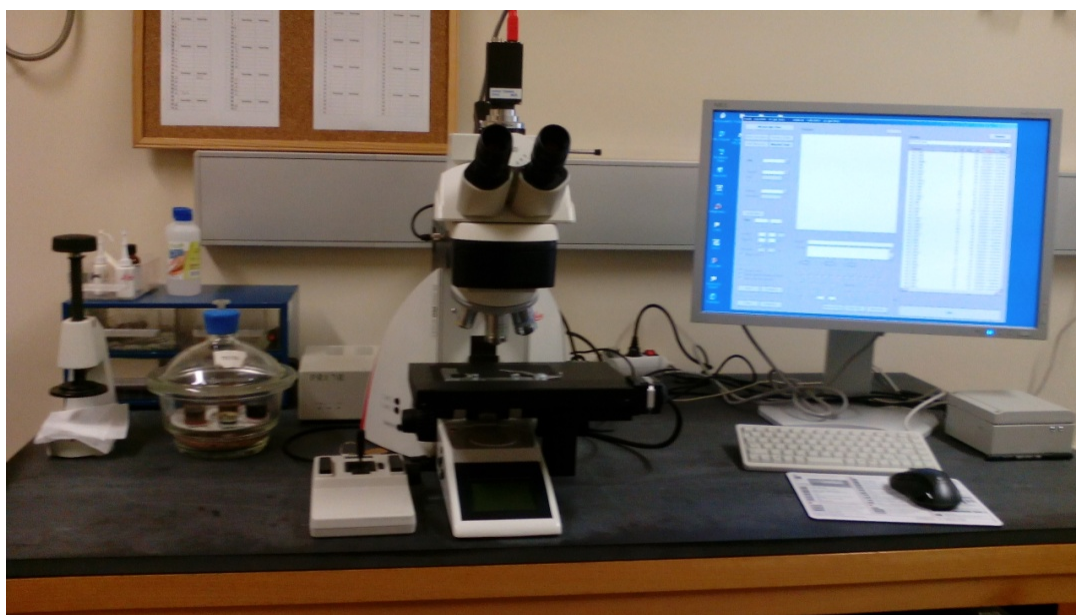


Figura 3.8. Microscópio petrográfico (Leica DM4000 equipado com o software “Fossil” da Technisches Büro Hilgers) com iluminação LED (branca e azul), câmaras de cor e preto e branco e software para determinação da reflectância, aquisição de fotografias (software “Discus”) e observação em luz branca e fluorescência. Inclui platina motorizada.

Capítulo 4 - Resultados e interpretação dos dados

4.1. Descrição dos afloramentos

Pela análise da carta geológica, a localização geográfica dos afloramentos, a litologia e ainda os resultados da análise geoquímica das amostras foram identificadas as formações onde foi realizada a amostragem. Nos afloramentos foram identificadas três formações, que são: Formação de Wailuli, Formação de Aituto e Formação de Cribas. Os afloramentos A, I e J correspondem à Formação de Wailuli, os afloramentos C, D, E, F, G e H à Formação de Aituto e o afloramento B à Formação de Cribas. O afloramento H encontra-se na transição da Formação do Aituto para a Formação de Wailuli.

Foram descritos vários aspectos físicos (cor e granulometria) e químicos (reação das amostras com o ácido HCl) de todas as amostras. Nos afloramentos foram observados algumas estruturas e laminações marcadas nas amostras. Essas informações estão sumariadas na tabela 4.1.

Tabela 4.1. Caracterização das amostras com a indicação das formações em que foram colhidas.

Afloramento	Amostra	Cor	Efervescência com HCl	Laminação	Granulometria	Estrutura	Formação
A	FS1A	Cinzeno	Sim - Carbonato	-	Fino	-	Arenitos ou calcarenitos da Formação de Wailuli
	FS2A	Cinzeno clara	Sim - Carbonato	-	Muito fino	-	
B	FS1B	Cinzeno	Não	-	Fino	-	Argilitos cinzentos da Formação de Cribas
	FS2B	Cinzeno amarelada	Não	Paralela	Fino	-	
	FS4B	Cinzeno e negro	Cinzeno = sim - carbonato; negro = não	-	Fino	-	
C	FS1C	Cinzeno com níveis negros	Cinzeno = sim - carbonato; negro = não	-	Muito fino	-	Calcários da Formação de Aituto
	FS2C	Cinzeno	Carbonato	Paralela	Fino	Presença de filonetes	
	FS3C	Cinzeno a negro	Cinzeno = sim - carbonato; negro = não	Cruzada	Muito fino	Muitas fraturas	
D	FS1D	Cinzeno escuro	Sim - Carbonato	Paralela	Fino	-	Calcário da Formação de Aituto
	FS2D	Cinzeno escuro	Fraca efervescência - algum carbonato	Paralela	Fino	Apresenta lineação materializada por minerais de cor negra	
	FS3D	Cinzeno escuro	Fraca efervescência - algum carbonato	Paralela	Fino	-	
E	FS1E	Cinzeno a negro	Cinzeno = sim - carbonato; negro = não	Paralela	Muito fino	Muitas fraturas	Calcário da Formação de Aituto
	FS2E	Cinzeno com óxidos de ferro	Sim - Carbonato	Cruzada	Fino	Filonetes a cortar a laminação	
	FS3E	Cinzeno	Sim - Carbonato	-	Fino	Filonetes de calcite	
F	FS1F	Cinzeno escuro	Sim - Carbonato	-	Fino	Filonetes de calcite	Calcário da Formação de Aituto
	FS2F	Cinzeno escuro	Sim - Carbonato	-	Muito fino	Fraturas com filonetes de calcite	

Tabela 4.2 (continuação) Caracterização das amostras com a indicação das formações em que foram colhidas.

G	FS1G	Esverdeado	Sim - Carbonato	-	Muito fino	Alguns filonetes de calcite	Calcários da Formação de Aituto
	FS2G	Esverdeado	Sim - Carbonato	-	Muito fino	Filonetes de calcite	
	FS3G	Esverdeado	Sim - Carbonato	Paralela	Fino	Filonetes de calcite	
H	FS1H	Cinzento	Sim - Carbonato	Paralela	Fino	-	Carbonatos em bancadas decimétricas da Formação de Aituto (na transição para a Formação do Wailuli)
	FS2H	Cinzento	Não	Paralela	Fino	-	
	FS3H	Cinzento claro	Sim - Carbonato	-	Fino	-	
I	FS1I	Cinzento	Não	Paralela	Fino	-	Barras areníticas e argilitos da Formação do Wailuli
	FS2I	Cinzento	Não	-	Muito fino	-	
	FS3I	Cinzento escuro	Não	-	Fino	-	
J	FS1J	Esverdeado	Fraca efervescência - algum carbonato	-	Muito fino	-	Barras areníticas e argilitos da Formação do Wailuli
	FS2J	Esverdeado	Não	-	Muito fino	-	
	FS3J	Esverdeado	Não	-	Muito fino	-	

4.1.1. Formação de Wailuli

As amostras dos afloramentos A, I e J estão localizados antes de entrar na vila de Cribas (Figura 4.1), na região a Norte. Segundo a localização geográfica e a carta geológica (Lopes et al., 2012), os afloramentos estão localizados no flanco Norte do anticlinal de Cribas.

O afloramento A localiza-se a Norte da vila de Cribas com as coordenadas geográficas de -8.59196 de longitude e 125.99679 de latitude. O afloramento é constituído por arenitos e calcarenitos da Formação de Wailuli (Figura 4.2A), sendo a atitude da estratificação de N070°; 22°NW. Neste afloramento foram colhidas duas amostras FS1A e FS2A. Macroscopicamente, a amostra FS1A apresenta cor cinzenta que é tipicamente de arenito com granulometria de grão fino. Enquanto a amostra FS2A apresenta cor cinzenta mais clara sendo um calcário-arenítico com granulometria relativamente muito fina.

O afloramento I está localizado a Norte da vila de Cribas (Figura 4.1) com as coordenadas geográficas de -8.59705 de longitude e 125.99066 de latitude. É constituído por bancadas de calcário pouco espessas (espessura menor que 10 cm) com alternância de xistos-argilosos (Figura 4.2B). Neste afloramento foram colhidas três amostras: FS1I, FS2I e FS3I. Macroscopicamente, as amostras apresentam cor cinzenta nas amostras FS1I e FS2I, e cinzenta escura na amostra FS3I e com granulometria fina a muito fina. Na amostra FS1I foi observar uma laminação paralela e as amostras apresentam poucas fraturas e filonetes de calcite. Todas as informações descritas estão disponíveis na tabela 4.2.

O afloramento J está localizado a Norte da vila de Cribas (Figura 4.1) e mais perto da vila de Manatuto (área urbana) com as coordenadas geográficas de -8.56340 de longitude e 125.99892 de latitude. As unidades litológicas deste afloramento são constituídas por sequências pelíticas com carbonatos de tons esverdeados laminados com a intercalação de quartzo-arenitos e xistos argilosos (Figura 4.2C). A atitude da estratificação neste afloramento é N132°; 38°NE. Foram colhidas três amostras: FS1J, FS2J e FS3J.

Macroscopicamente, as três amostras apresentam cor esverdeada e granulometria muito fina.

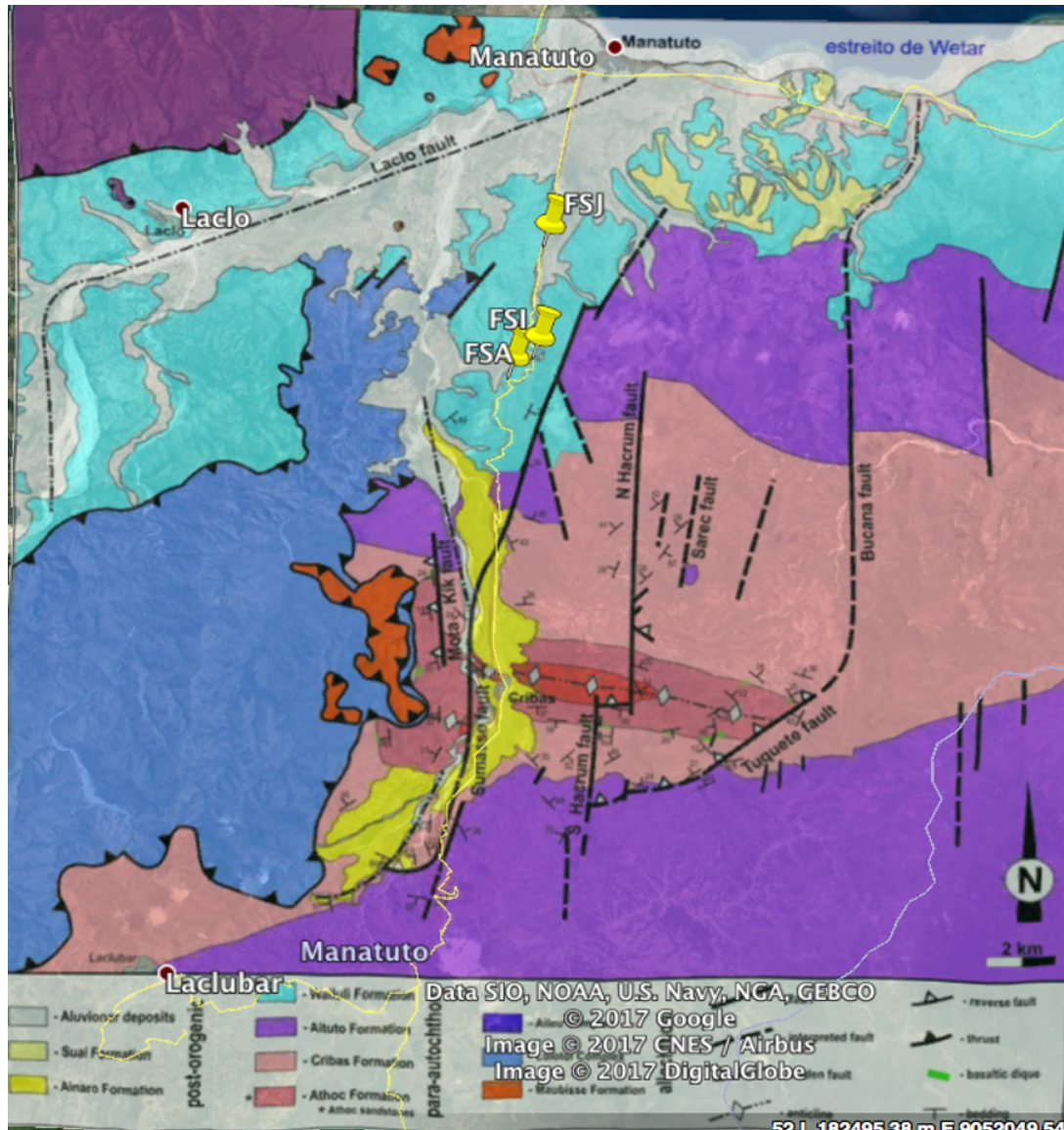


Figura 4.1. Mapa de localização dos afloramentos onde foram colhidas as amostras pertencentes à Formação de Wailuli.



Figura 4.2. Afloramentos da Formação de Wailuli. A. Afloramento A; B. Afloramento I; e, C. Afloramento J.

4.1.2. Formação de Aituto

Os afloramentos C, D, E e F estão localizados no flanco Sul do anticlinal de Cribas enquanto os afloramentos G e H estão localizados no flanco Norte do Anticlinal de Cribas (Figura 4.3). As coordenadas geográficas de cada afloramento estão indicadas na tabela 3.1.

A atitude da estratificação nas sequências carbonatadas do afloramento C é N160°; 30°SW e no afloramento E tem uma direção quase norte-sul com inclinação de 48° para oeste. A variação da atitude da estratificação observada considera-se devida à intervenção da falha de direção NNE-SSW como pode ser observada na figura 4.3.

As litologias identificadas nestes afloramentos são essencialmente bancadas espessas de calcários com intercalações de argilas. Estas bancadas

estão escavadas devido à construção da estrada que liga Manatuto e Laclubar. Nos afloramentos C (Figura 4.4A), D (Figura 4.4B) e E (Figura 4.4C) foram colhidas 3 amostras em cada um deles, respectivamente: FS1C, FS2C e FS3C; FS1D, FS2D e FS3D; e, FS1E, FS2E e FS3E. O afloramento F (Figura 4.4D) localiza-se próximo da zona de transição entre a Formação Aituto e a Formação Cribas (Figura 4.3).

O afloramento G está situado a Norte do anticlinal de Cribas na zona central de território de Timor-Leste, e a atitude da estratificação das sequências é de N110°; 32°NE. Neste afloramento (Figura 4.4E) e no afloramento H (Figura 4.4F) foram colhidas três amostras em cada um deles, respectivamente: FS1G, FS2G e FS3G; e, FS1H, FS2H e FS3H.

Macroscopicamente as amostras apresentam, na sua maioria, cor cinzenta. Algumas amostras apresentam tons de cinzento mais escuro, cinzento-claro e cinzento mais amarelado, devido à presença de óxidos de ferro, e, ainda esverdeados. Em algumas das amostras observamos alguns níveis negros que possivelmente correspondem à alternância de calcário com argilas. A granulometria das amostras são relativamente fina a muito fina.

As estruturas sedimentares encontradas são laminação paralela e cruzadas e, ainda, se observou a ocorrência de alguns filonetos de calcite. Notou-se que as amostras mais fraturadas apresentam a ocorrência desses filonetes.

O afloramento H (Figura 4.4F) localiza-se muito próximo da zona de transição entre a Formação de Aituto e a Formação de Wailuli (Figura 4.3).

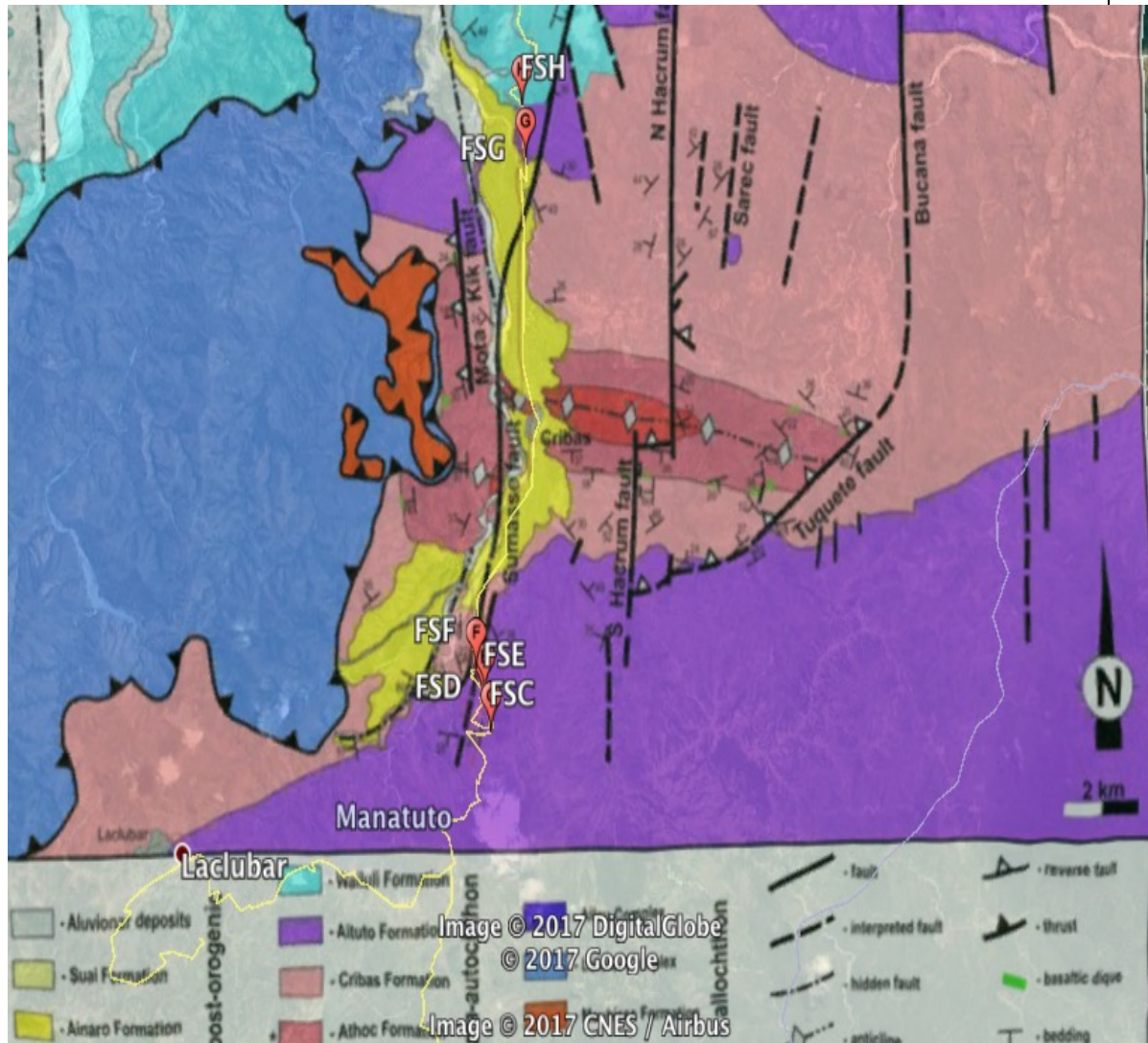


Figura 4.3. Localização dos afloramentos na Formação de Aituto.

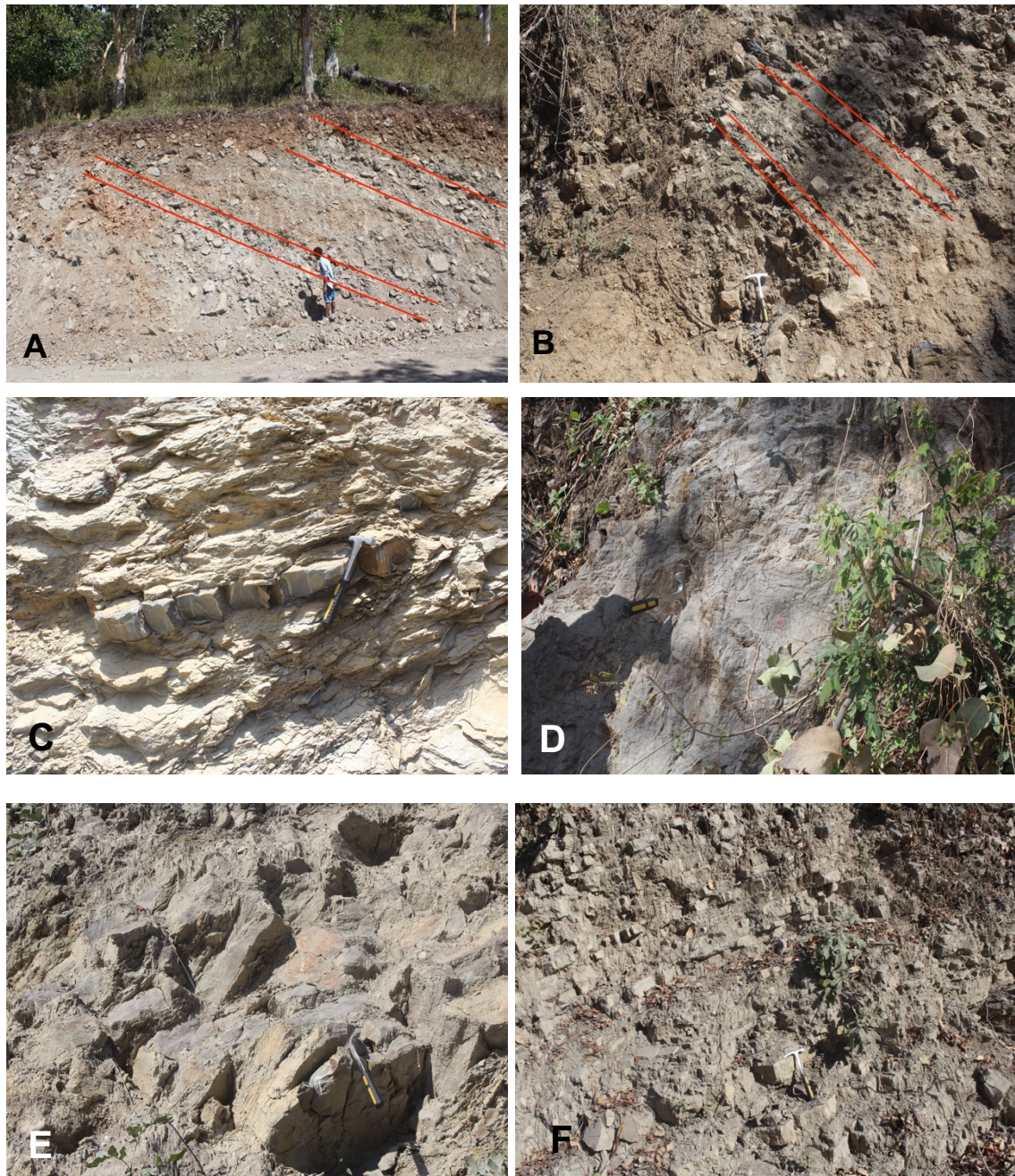


Figura 4.4. Afloramentos da Formação de Aituto. A. Afloramento C; B. Afloramento D; C. Afloramento E; D. Afloramento F; E. Afloramento G; e, F. Afloramento H.

Amostras dos afloramentos D, E e F foram selecionada para observação microscópica dos carbonatos com recurso a lâmina delgada. O objetivo deste estudo é confirmar a litologia das amostras colhidas e assim confirmar a formação a que pertencem. Verificou-se que a amostra do afloramento D (FS1D) é um calcário micrítico com bioclastos de concha muito fina, indicando

que se depositou em profundidade (Figura 4.5A e B). Observou-se, ainda, a alternância de níveis mais escuros com níveis mais claros (Figura 4.5A).

A amostra do afloramento E selecionada para observação no microscópio de luz transmitida, em lâmina delgada, foi a amostra FS1E. O resultado neste estudo indica que a amostra selecionada é um calcário micrítico com bioclastos de concha muito fina, indicando um ambiente de deposição profundo, com níveis de elevada esparitização (Figura 4.5C). Observaram-se, ainda, cristais de dolomite com formas romboédricas. A dolomite resultou de processos de substituição da calcite. Estes processos de substituição ocorrem um pouco por toda a rocha mas são mais evidentes nas fraturas (Figura 4.5D).

A amostra do afloramento F (FS1F) é um calcário micrítico (Figura 4.5E) apesar do teor do resíduo insolúvel ser muito baixo, 6 % (corresponde a um teor de CaCO_3 de 94%), sendo indicativo de um carbonato quase puro. Esse valor parece estar influenciado pela presença de filonetes de calcites com tamanho e espessura variável (Figura 4.5F).

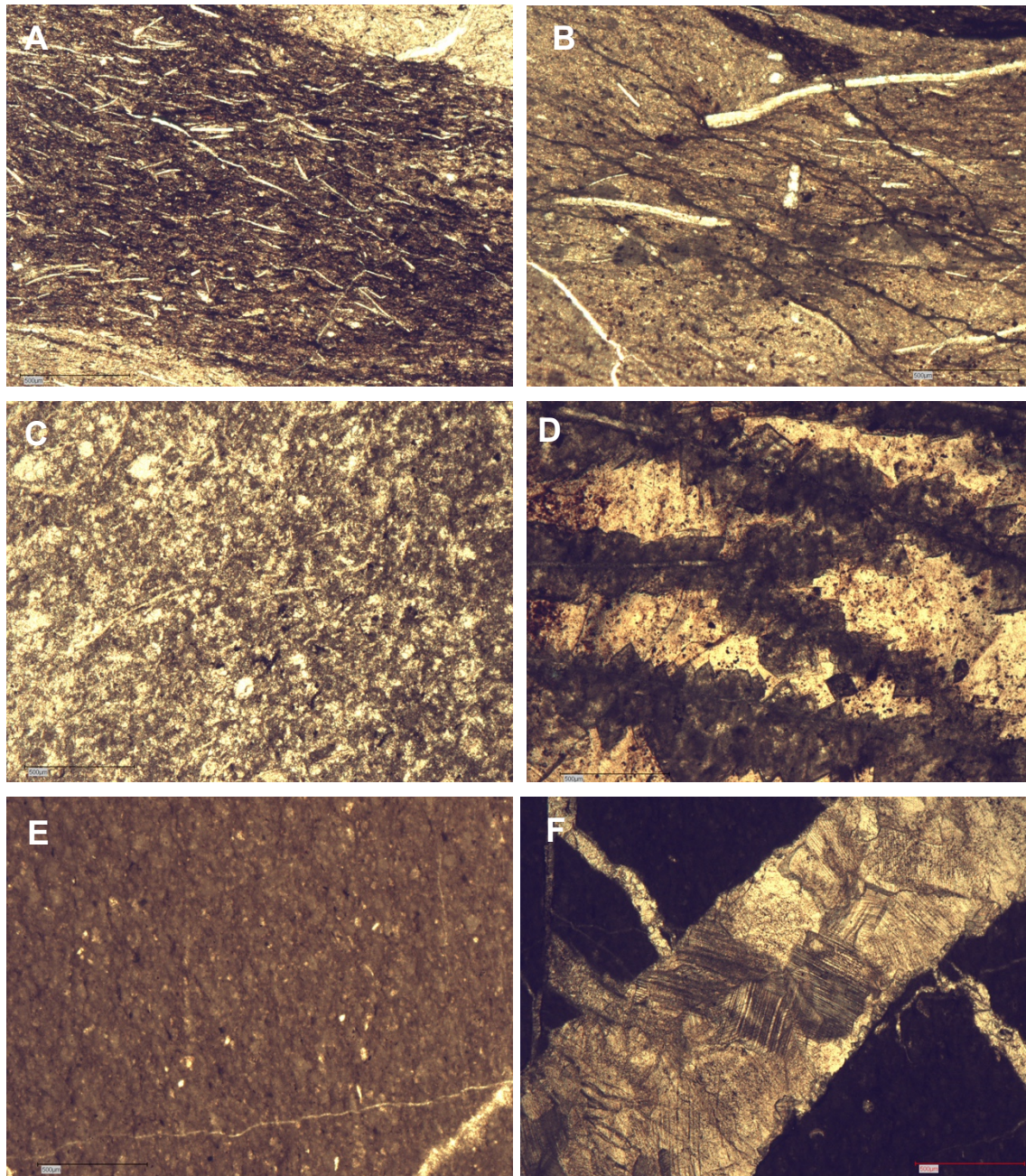


Figura 4.5. Microfotografias das amostras dos afloramentos D (A e B), E (C e D) e F (E e F). A e B. calcário micrítico com bioclastos de concha fina e alternância de níveis mais escuros e mais claros. C. Calcário micrítico com esparitização. D. Cristais romboédricos de dolomite de substituição a preencher fracturas. E. Calcário micritico. F. Filonetes de calcite, por vezes muito espessos.

Todas as microfotografias foram obtidas em nicois paralelos.

4.1.3. Formação de Cribas

A Formação de Cribas foi amostrada no afloramento B, onde foram colhidas 3 amostras: FS1B, FS2B, FS4B. A localização do afloramento está na zona de transição com a Formação de Aituto (Figura 4.6A) no flanco Sul do anticlinal de Cribas. A estratificação apresenta a atitude de N100°; 50°SW. A litologia (Figura 4.6B) é constituída por níveis de argilitos de cor amarelada na amostra FS2B, cinzentos na amostra FS1B, e alguns níveis de cor negra na amostra FS4B resultantes da presença de MO.

Macroscopicamente as rochas apresentam granulometria muito fina e com laminação paralela (Tabela 4.1). Segundo Charlton et al. (2002), os sedimentos clásticos desta formação são predominantemente finos, derivados de fontes siliciclásticas distantes, e intercalados com sedimentos derivados de rochas vulcânicas e de carbonatos dos blocos horst adjacentes.

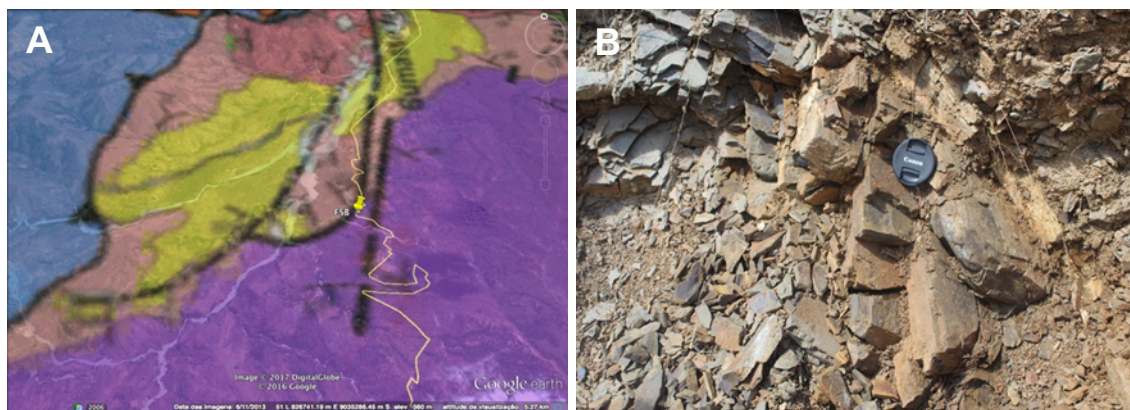


Figura 4.6. A. Localização do afloramento B; B. Afloramento onde foram colhidas as amostras da Formação de Cribas.

4.2. Geoquímica orgânica

Os dados obtidos nas análises de geoquímica orgânica (COT, St e RI) das amostras estudadas são apresentados na tabela 4.2.

Na análise de geoquímica, a abundância de MO nos sedimentos é normalmente expressa como a percentagem em massa, na base seco, do carbono orgânico total (Tyson, 1995). Do ponto de vista da prospecção petrolífera uma rocha-mãe do petróleo deve ter valor do COT superior a 0,5% para sequências siliciclástica e 0,3% para sequências carbonatadas (Tyson, 1995).

Por sua vez, os valores do enxofre total (0-4%) estão associados ao ambiente de deposição, sendo mais elevados em ambientes marinhos (Mendonça Filho, 2010). Por sua vez, o Resíduo Insolúvel (RI%) permite avaliar a composição da rocha em carbonatadas ou materiais argilosos. Valores elevados de RI indicam a presença de rochas pelíticas e valores baixos indicam a presença de carbonatos.

4.2.1. Formação de Wailuli

Os resultados de COT para as amostras desta formação variam entre 0,05%, na amostra FS1J, e 0,88%, na amostra FS2I, sendo que na maioria das amostras colhidas é menor do que 0,5% (excepto nas amostras FS2I e FS2J). As amostras com conteúdo de COT menor de 0,5% são consideradas como pobre a muito pobre em MO e acima deste valor é indicativo de ter potencialidade de ser uma boa rocha-mãe do petróleo. Os valores de enxofre variam entre 0,01% na amostra FS1A e 0,1% na amostra FS2J, sendo considerados valores baixos. O resultado do RI varia entre 54%, na amostra FS1A, e 93%, na amostra FS2J. Estes resultados indicam que a maioria das amostras é constituída por sequências pelíticas, com um RI médio de 88%, tendo, no entanto as amostras do afloramento A um carácter mais carbonatado.

4.2.2. Formação de Aituto

Nesta formação, o COT das amostras varia entre 0,07, na amostra FS3G, e 0,64 na amostra GA_49_573. Uma vez que esta formação é constituída essencialmente por carbonatos, considera-se que, pelo menos, alguns níveis apesar dos valores baixos de COT podem ser considerados como propícios para rocha-mãe do petróleo. Os resultados do enxofre total nesta formação variam entre 0,01%, na amostra FS2G, e 0,34%, na amostra FS2C. Os valores do RI variam entre 2,5% na amostra FS1E e 908% na amostra GA_49_573 e como uma média de 39%, sendo na sua maioria rochas carbonatadas. No entanto, as amostras FS1H, FS2H, FS1D, FS2D e FS3D são de sequências pelíticas.

4.2.3. Formação de Cribas

Os valores de COT das amostras apresentam um valor máximo de 0,77%, na amostra AC_Rh_WPT_034, e um valor mínimo de 0,34%, na amostra FS2B. Com esse intervalo consideramos que a percentagem de MO é pobre, excepto a amostra AC_Rh_WPT_034, uma vez que esta formação corresponde a uma sequência pelítica. O valor do enxofre total varia entre 0,03%, na amostra AC_Rh_WPT_034, e 0,07%, na amostra FS4B, correspondendo a valores muito baixos. Os dados do RI para esta formação são de 85-87%. Este valor indica que as amostras são pelíticas.

4.2.4. Formação de Atahoc

A amostra apresenta um valor de COT de 0,34%, St de 0,25% e RI de 86%. Esta amostra apresenta uma composição pelítica com teor de enxofre total relativamente elevado e pobre em MO.

Tabela 4.3. Resultado de COT, St, RI das amostras estudadas.

Formação	Afloramento	Nº Amostra	COT%	St %	RI %
Wailuli	A	FS1A	0,096	0,01	54
		FS2A	0,12	0,030	75
	I	FS1I	0,12	ND	87
		FS2I	0,88	0,078	91
		FS3I	0,31	0,046	89
	J	FS1J	0,053	ND	91
		FS2J	0,67	0,080	93
		FS3J	0,064	0,040	90
		AQ 04	0,23	0,013	88
Transição Formação Wailuli - Aituto	H	FS1H	0,31	0,025	62
		FS2H	0,099	ND	88
		FS3H	0,28	0,034	40
Aituto	C	FS1C	0,25	0,12	49
		FS2C	0,13	0,34	50
		FS3C	0,15	0,037	20
	D	FS1D	0,54	0,040	82
		FS2D	0,49	0,038	75
		FS3D	0,49	0,051	80
	E	FS1E	0,14	ND	2,5
		FS2E	0,22	0,035	48
		FS3E	0,12	0,29	23
	G	FS1G	ND	ND	14
		FS2G	0,14	0,013	17
		FS3G	0,077	ND	23
	F	FS1F	0,22	0,011	6
		FS2F	0,092	0,002	3
		GA 49 573	0,64	0,10	90
Cribas	B	FS1B	0,40	0,059	87
		FS2B	0,34	0,051	87
		FS4B	0,43	0,067	87
		AC RH WPT 034	0,77	0,030	85
Atahoc		AC RH WPT 217	0,34	0,25	86

ND – não detectado

4.3. Petrologia orgânica

No estudo de petrologia orgânica realizou-se uma análise descritiva das características da MOD. Essa análise foi o resultado da observação em microscópica em luz branca reflectida e luz azul incidente (fluorescência) das superfícies polidas. Os resultados vão ser apresentados por formações: Formação de Wailuli, Formação de Aituto, Formação de Cribas e Formação de Atahoc. Foi possível identificar os diferentes tipos de partículas orgânicas de acordo com a classificação ICCP/TSOP (2002) tal como são apresentados na tabela 1.1.

Neste estudo, foram ainda observadas as lâminas de palinofácies para apoiar na identificação das partículas.

4.3.1. Formação de Wailuli

Tal como referido anteriormente, as amostras da Formação do Wailulli apresentam características essencialmente pelíticas ($RI > 87\%$) ainda que as amostras do afloramento A sejam níveis mais carbonatados (RI de 54% e 75%). O teor de COT é muito variável, apresentando apenas duas amostras um valor de COT superior a 0,5%, sendo as amostras do afloramento I aquelas que, globalmente apresentam maiores percentagens.

Nas amostras dos afloramentos A e I a fracção orgânica é representada essencialmente por macerais dos grupos da vitrinite e inertinite. Foram também identificados produtos secundários (betumes sólidos) e zooclastos. As amostras do afloramento I são aquelas que apresentam maior percentagem de MO. Este resultado é compatível com os resultados de COT (Tabela 4.2). As amostras do afloramento J são muito pobre em MO sendo muito difícil a identificação destas partículas. No entanto, foram encontradas partículas orgânicas dos grupos da vitrinite e inertinite, e betumes sólidos. Na amostra FS2I, do afloramento I, a quantidade de MO é maior do que nas outras amostras desta formação, tal como indica o teor de COT mais elevado de todas as amostras estudadas (Tabela 4.2).

Nas amostras dos afloramentos A e I e na amostra AQ_04, a vitrinite é o grupo de macerais mais abundante seguido pela inertinite, betumes sólidos e zooclastos, sendo que é muito difícil de encontrar partículas de liptinite em rocha total. O tamanho das partículas de vitrinite é variado, observando-se partículas cujas dimensões varia entre 18 μm e aproximadamente 90 μm (Figura 4.7A). A maioria das partículas são pequenas e são representadas por materiais gelificados. Essas partículas, em alguns casos, apresentam superfícies irregulares e alongadas (Figura 4.7B), apresentando fendas perpendiculares ao alongamento, como se pode observar na figura 4.7A. Foram, ainda, identificadas partículas de vitrinite com forma circular e ou ligeiramente circular (Figura 4.7D), com refletância superior às restantes partículas de vitrinite, sendo interpretadas como materiais retrabalhados e provenientes de formações mais antigas.

Os macerais do grupo da inertinite nas amostras na Formação de Wailuli apresentam a superfície lisa com tons cinzentos mais claros (Figura 4.8A), apresentando tamanho variável sendo que na maioria são de pequenas dimensões (menores que 50 μm). A forma destas partículas é variável, por vezes preservando a estrutura celular (Figura 4.8A). As partículas apresentam refletância mais elevada.

A liptinite nas amostras de Formação de Wailuli é muito rara e apresenta uma fluorescência de cor amarelo dourado. Foram identificadas partículas de lamalginite muito finas (Figura 4.9C) e ainda de telalginite de forma arredondada (Figura 4.9A), identificada na lâmina de palinofácies como Prasinófitas (Figura 4.9B) características de ambientes marinhos (Mendonça Filho et al., 2014; Mendonça Filho & Gonçalves, 2017; Pickel et al., 2017;). A esporinite (Figura 4.9D) é muito rara.

Estas características indicam que o tipo de cerogénio presente nestas amostras é um cerogénio de tipo III.

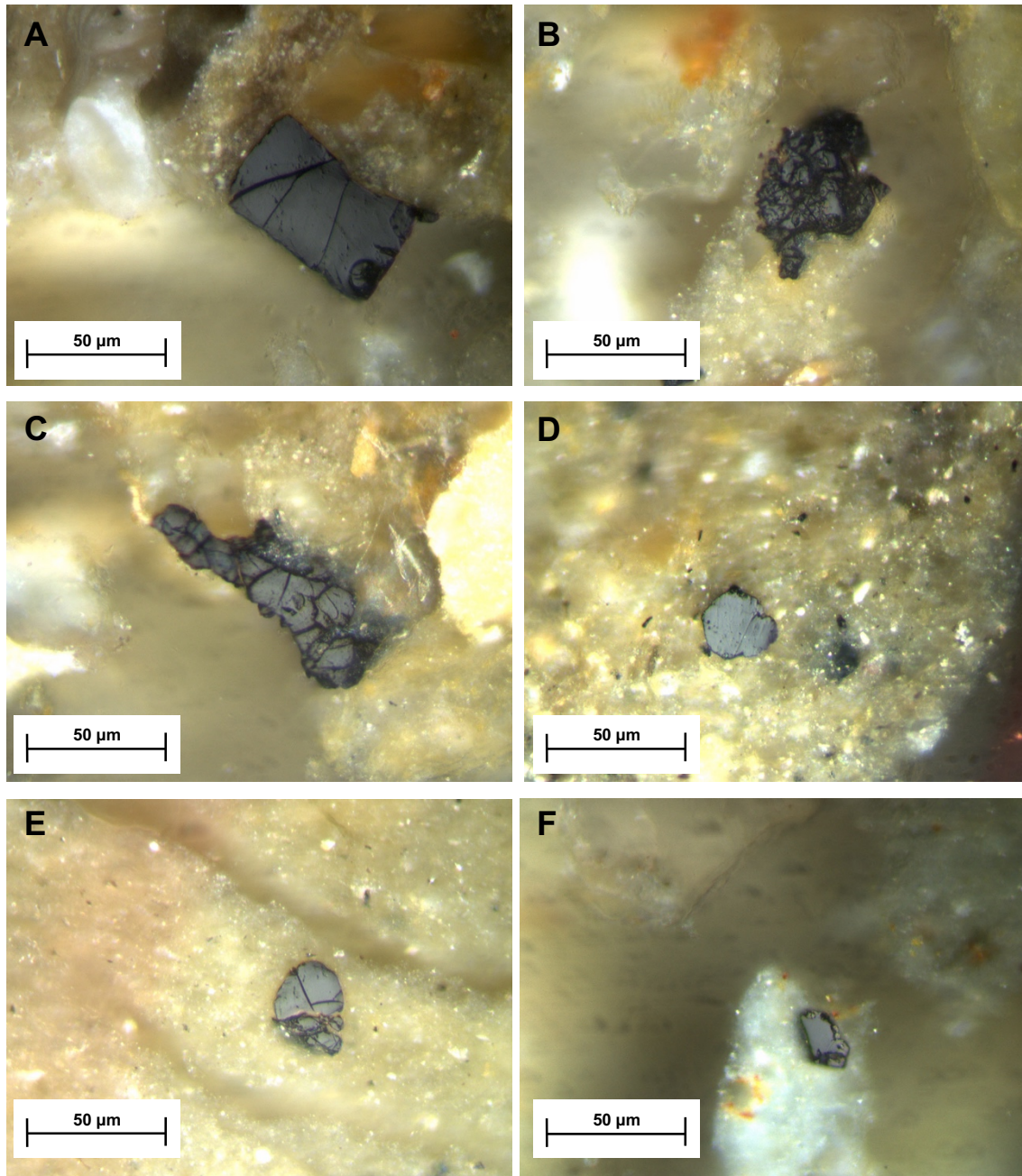


Figura 4.7. Microfotografias de partículas de vitrinite encontradas na Formação de Wailuli. A, B, C e D: afloramentos A e I; E: amostra AQ_04; e, F: afloramento J.

Todas as microfotografias foram obtidas em luz branca reflectida.

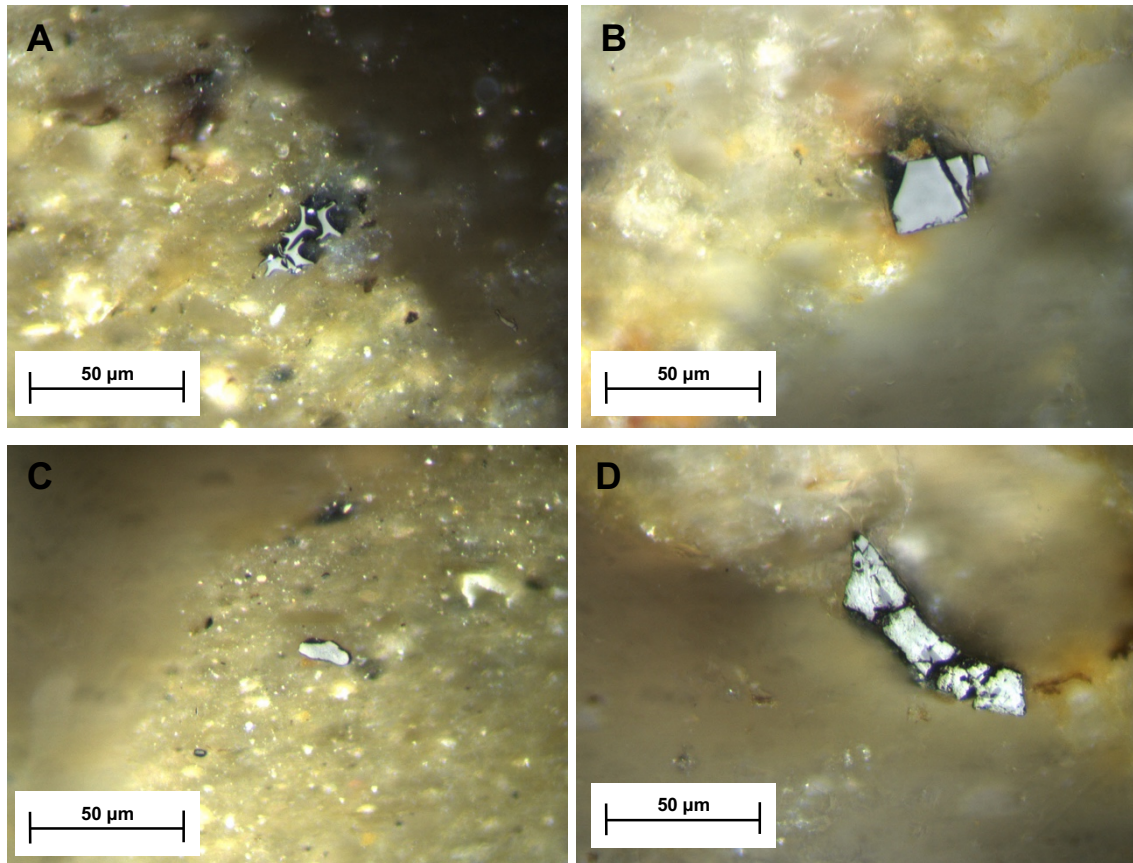


Figura 4.8. Microfotografias dos aspetos da inertinite encontradas nas amostras de Formação Wailuli. A, B e D: afloramentos A e I; C: amostra AQ_04.

Todas as microfotografias foram obtidas em luz branca reflectida.

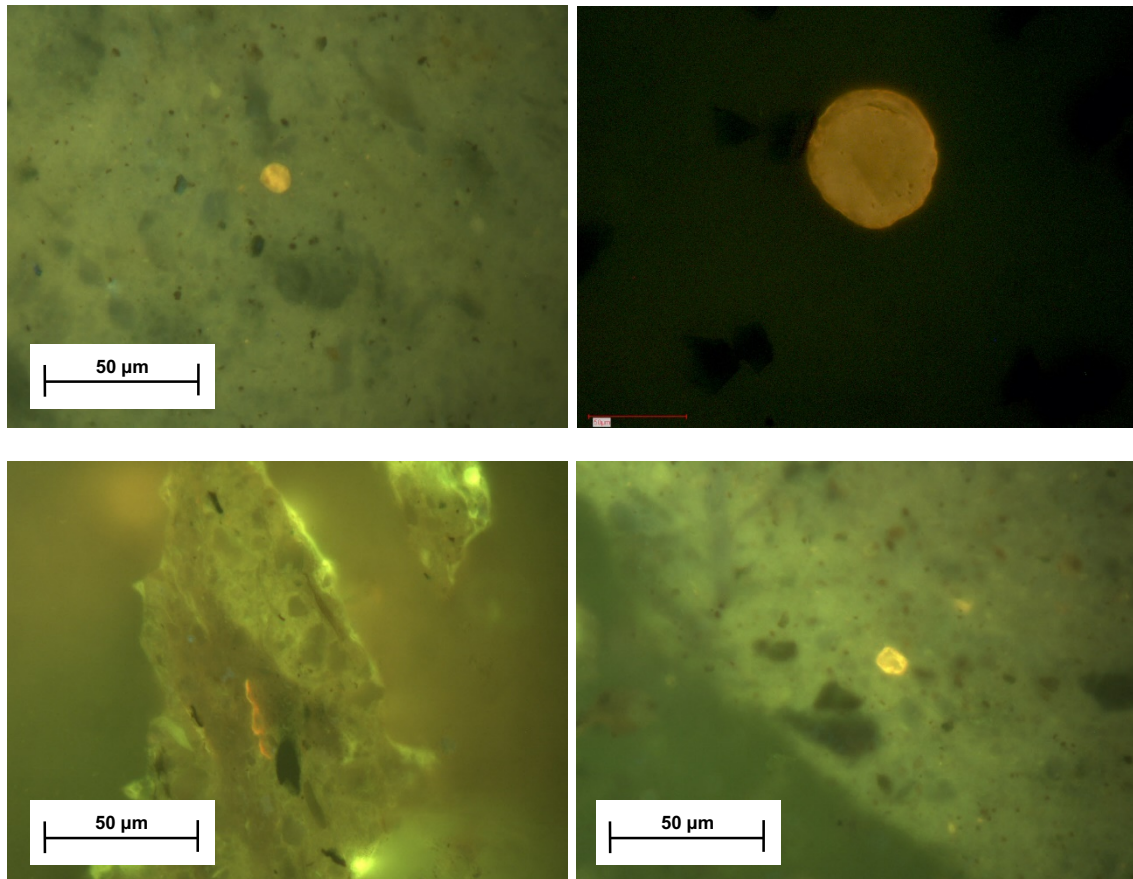


Figura 4.9. Microfotografias da liptinite das amostras de Formação Wailuli do afloramento J.

Microfotografias obtidas em luz azul incidente (fluorescência). A,C e D: em rocha total; B: em lâmina de palinofácies.

Os produtos secundários identificados nas amostras da Formação de Wailuli são betumes sólidos que ocorrem a preencher os espaços livres na matéria mineral, a preencher fraturas com espessuras variadas, ou o espaço deixado pela dissolução de romboedros de carbonatos (Figura 4.10A) ou dispersos na matéria mineral (Figura 4.10B). A reflectância desses betumes é variável podendo ser semelhante à da vitrinite da mesma amostra ou superior (Figura 4.10B). Os valores de refletância medidos em algumas amostras permitiram a identificação de duas ou três famílias de betumes sólidos nesta formação com refletâncias que variam entre 0,6% e 0,9%, outra de 1,1% a 1,3% e uma outra família de refletância entre 2,1 a 3,0%. (Figura 4.10C-F). De acordo com a classificação de Jacob (1989) estes betumes são classificados de epi-impsonite e meso-impsonite.

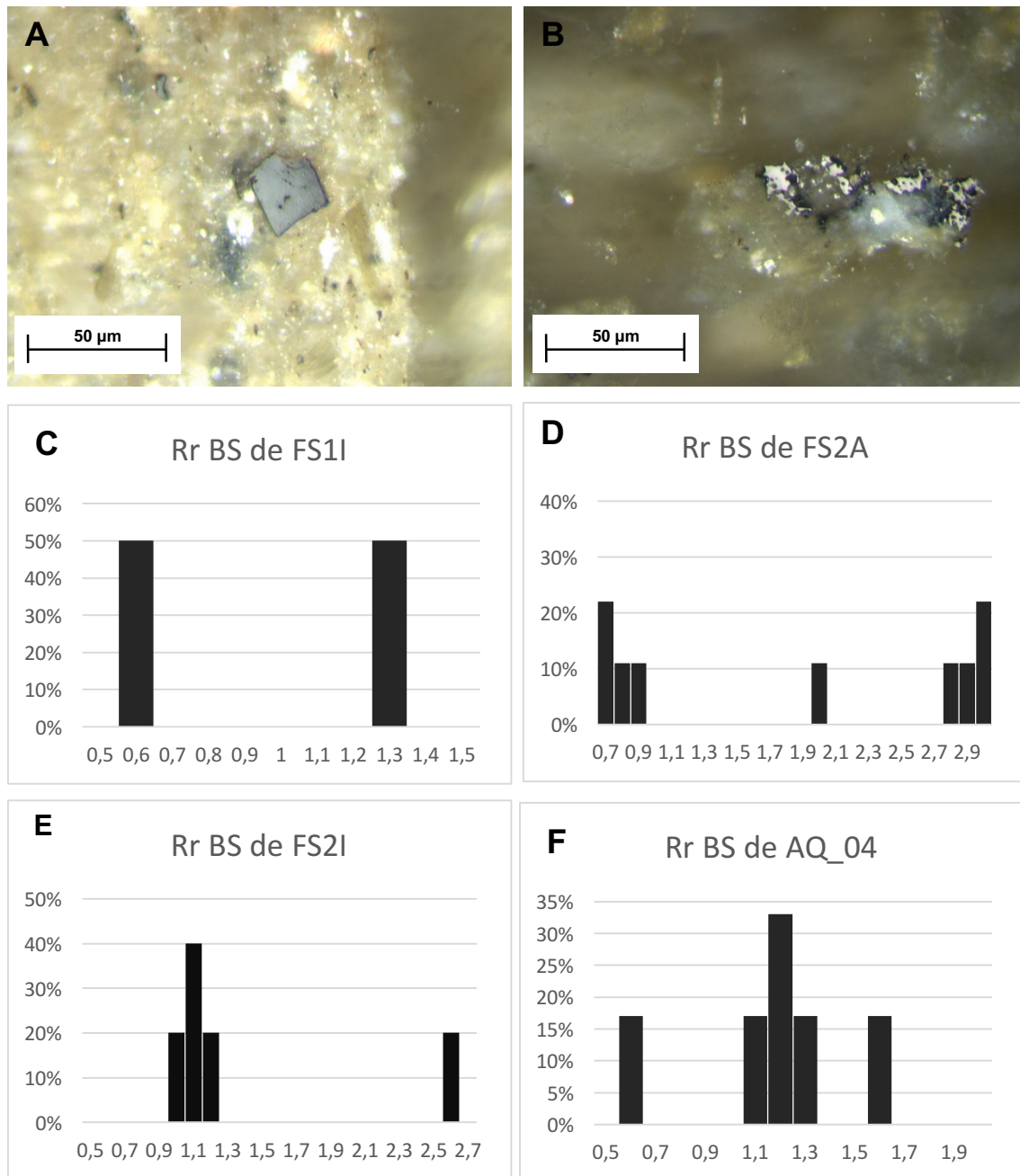


Figura 4.10. A e B: Microfotografias do aspeto dos betumes sólidos; C a F. Histograma com os valores de reflectância das famílias de betumes sólidos (BS) medidas nas amostras na Formação de Wailuli.

Também se identificaram zooclastos (origem animal) em algumas amostras na Formação de Wailuli (Figura 4.11). Os zooclastos representados na figura 4.11A-D parecem corresponder a hidrozoários (Mendonça Filho et al., 2016) com formas correspondentes a diferentes partes das colónias de pólipos. De notar a forma característica de pólipo na figura 4.11C e a bifurcação simpodial de colónia na figura 4.11D. Nas figuras 4.11A e B estão

representados parte do estolão onde se fixam as colónias ou os pólipos individuais de hidrozoários. Estas partículas apresentam diferente reflectância devido ao grau de oxidação.

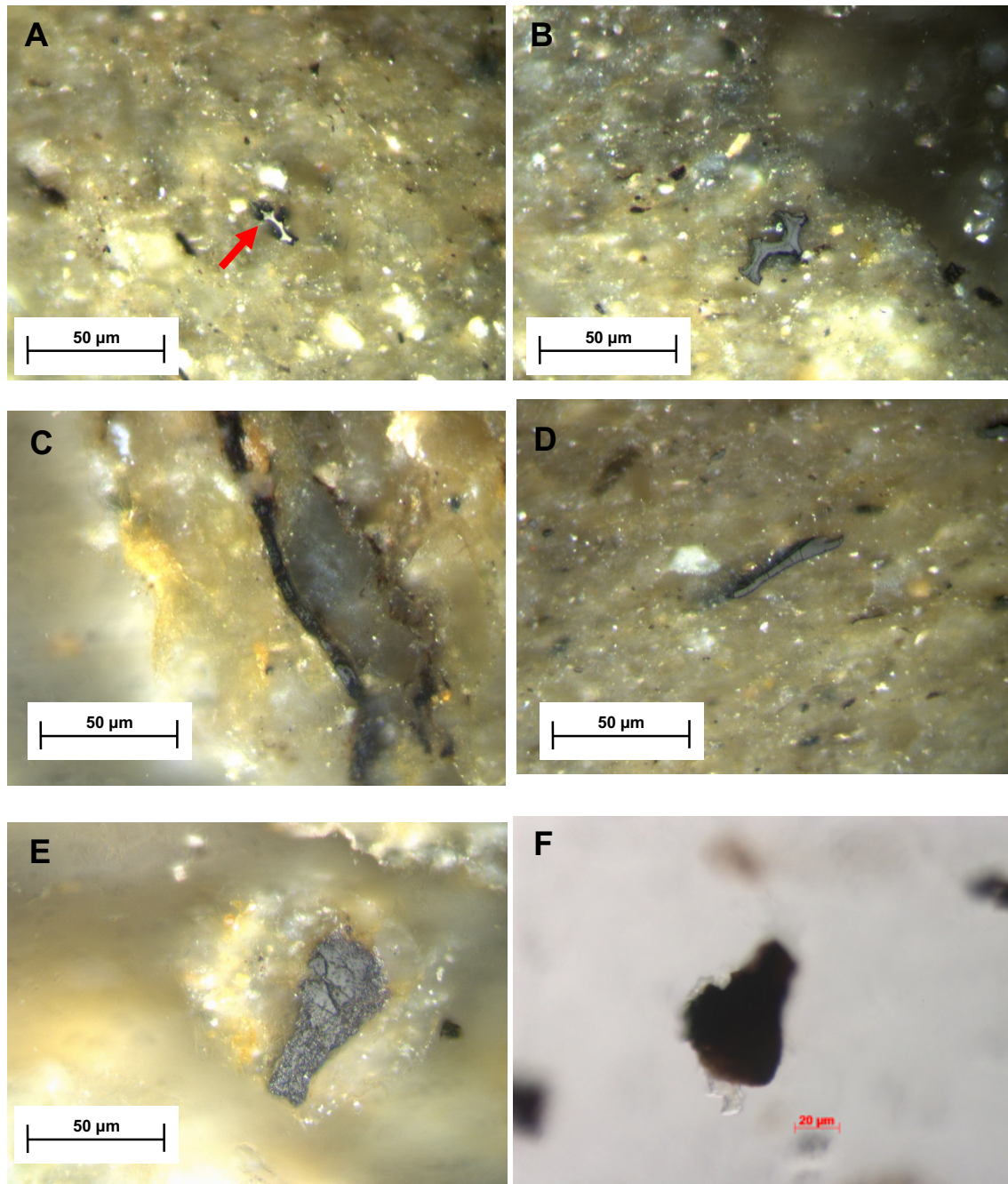


Figura 4.11. Microfotografia das partículas de zooclastos/zoomorfos das Formação de Wailuli.

Microfotografias obtidas em luz branca reflectida (A a E) e luz branca transmitida (F). A a E: rocha total; F: lâmina de palinofácies.

Foram, ainda, identificados quitinozoários (Figura 4.11E) com a forma de garrafa característica. Estes zoomorfos foram identificados também na lâmina de palinofácies (Figura 4.11F). Estes organismos extinguiram-se no Devónico e por essa razão ocorrem nesta amostras como sendo provenientes de retrabalhamento de formações dessa idade ou mais antigas (Mendonça Filho et al., 2014). De notar que a reflectância é superior à da vitrinite confirmando que esse material é proveniente de formações mais antigas.

Relativamente a matéria mineral, as amostras estudadas são maioritariamente rochas pelíticas (Tabela 4.1) constituídas por minerais silicatados. Em luz branca ocorrem com cores de cinzento a laranja. Os carbonatos são mais dominantes no afloramento A com tons cinzento claro em luz branca refletida (Figura 4.12B). No afloramento J os carbonatos apresentam tons que variam entre cinzento claro e esverdeado (Figura 4.12D) principalmente na amostra FS3J. Foram, também, observados óxidos de ferro (Figura 4.12B) e pirite framboidal (Figura 4.12C).

Os resultados obtidos na caracterização da matéria orgânica desta formação foram já publicados e apresentados nas Jornadas do Instituto de Ciências da Terra (ICT) que decorreu na Universidade do Minho, Braga, em junho de 2017. O resumo publicado assim como o poster apresentado encontram-se no Anexo 1.

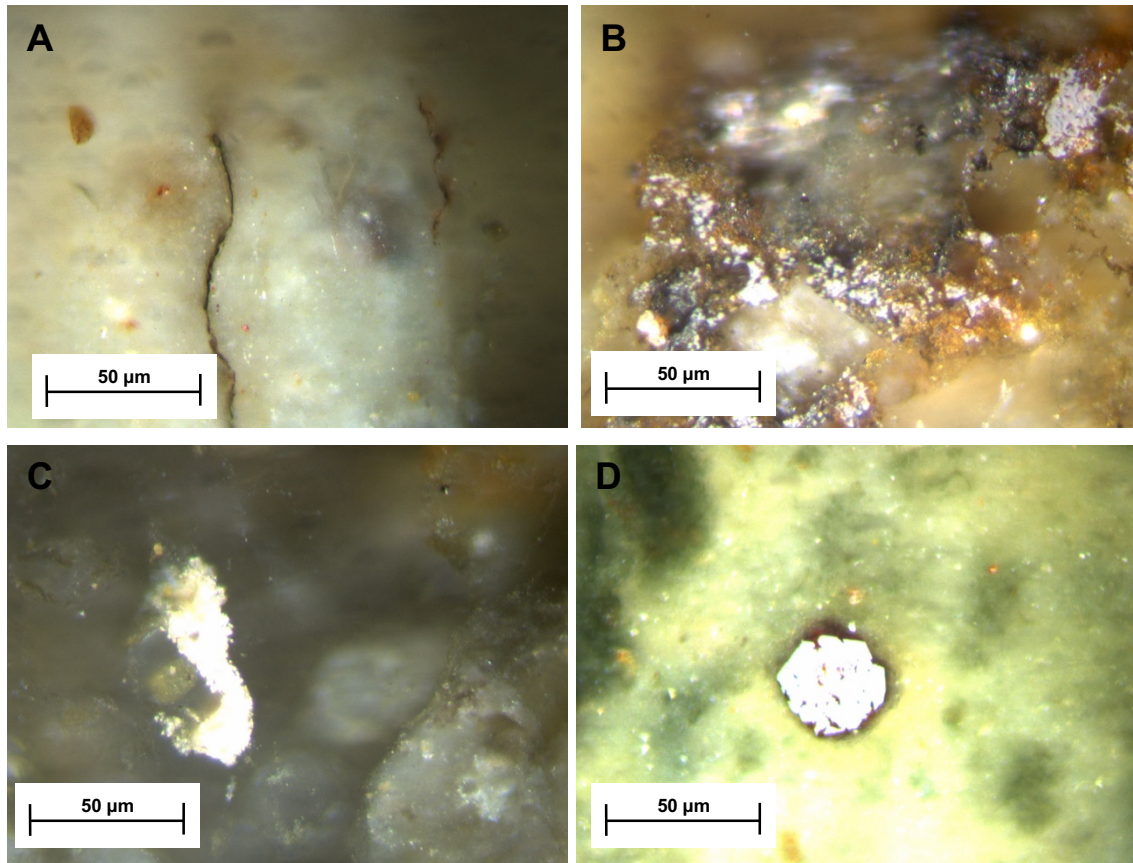


Figura 4.12. Microfotografias da matéria mineral (A, B, C e D) nas amostras da Formação de Wailuli. Microfotografias obtidas em luz branca reflectida.

4.3.2. Formação de Aituto

As amostras estudadas da Formação de Aituto, tal como mencionado em 4.2.2, apresentam características essencialmente carbonatadas (RI entre 2,5% e 75%) ainda que algumas das amostras correspondam a níveis mais pelíticos (RI > 80%). O teor de COT é muito variável, no entanto as amostras do afloramento D assim como a amostra GA 49 573 possuem valores superiores a 0,5%.

A percentagem de MO desta formação é inferior à da Formação de Wailuli e Cribas. As partículas da MO são de vitrinite, inertinite, zooclastos, betumes sólidos e traços de liptinite. As dominantes são as partículas de vitrinite sendo que no afloramento D observou-se abundância em betumes sólidos.

Por vezes foi difícil a distinção da vitrinite e da inertinite nas amostras estudadas. As partículas de vitrinite apresentam forma na maioria irregular e alongada, e apresentam-se gelificadas, onde não é visível a estrutura celular. O tamanho das partículas é variado, sendo quase sempre pequenas de aproximadamente 10 μm (Figura 4.13A). Os materiais mais gelificados (corpogelinite) apresentam superfície porosa intimamente associada a matéria mineral (minerais de argila) (Figura 4.13B). Ainda se observaram algumas partículas com forma circular a ligeiramente circulares (Figura 4.13C), com reflectância mais elevada, tendo sido interpretadas como MO retrabalhada. Nas amostras dos afloramentos E, G, F e H, as partículas de vitrinite ocorrem isoladas na matéria mineral (Figura 4.13A) e com forma alongada, irregulares e circulares. As partículas apresentam-se, também, muito fraturadas (Figura 4.13D).

A inertinite é o segundo grupo de macerais mais abundante nesta formação excepto no afloramento D. No afloramento C a quantidade de inertinite é quase semelhante à da vitrinite do ponto de vista ótico. Algumas partículas de inertinite apresentam grandes dimensões, de aproximadamente 150 μm (Figura 4.13E). Muitas das partículas estão fraturadas e apresentam superfície porosa (Figura 4.13F). Por sua vez, nas amostras dos afloramentos E, F, G e H as partículas de inertinite são na maioria pequenas com dimensão menor a 50 μm . Essas partículas apresentam a reflectância mais elevada.

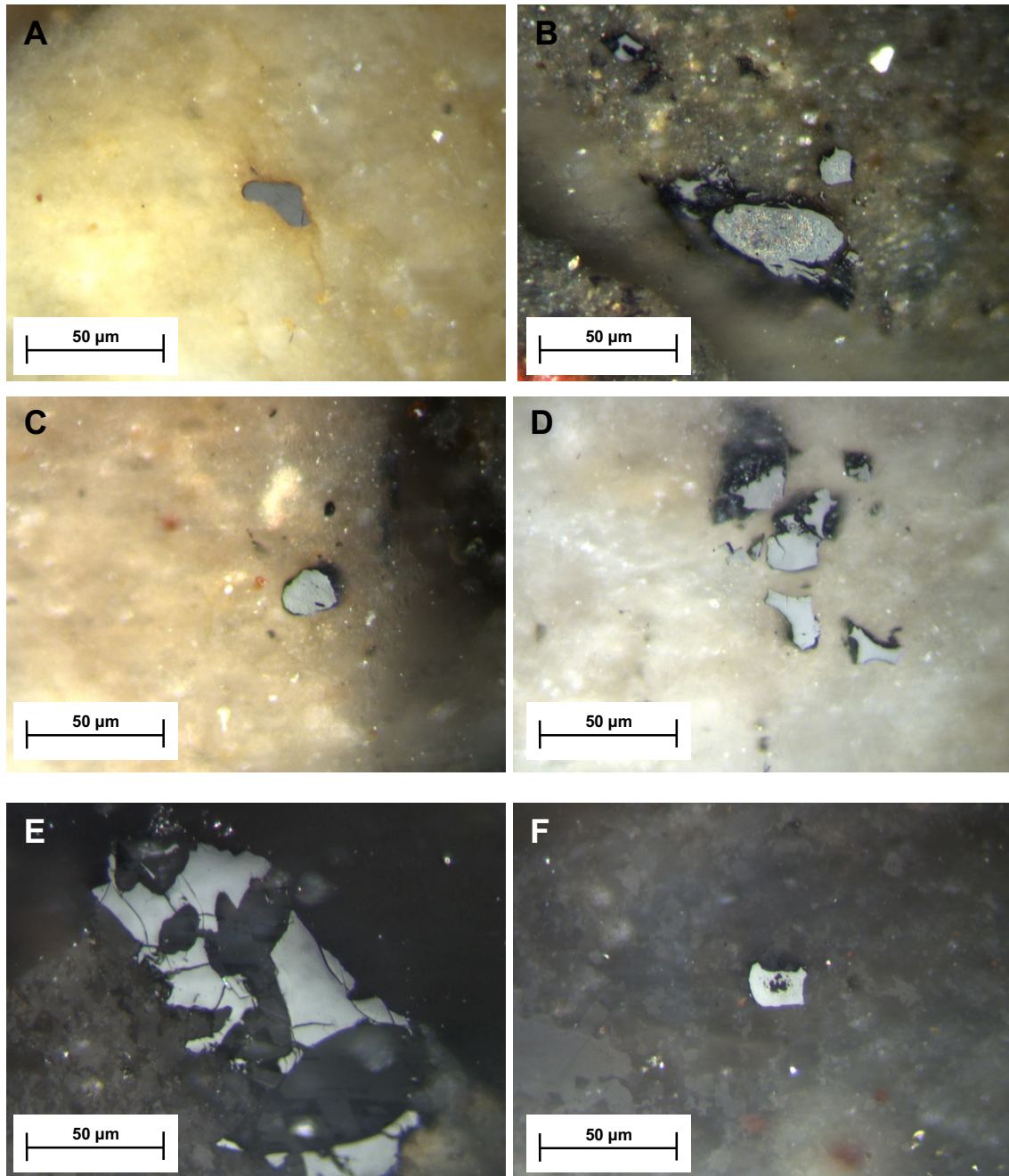


Figura 4.13. Microfotografias da vitrinite (A, B, C e D) e da inertinite (E e F) da Formação de Aituto.

Microfotografias obtidas em luz branca reflectida.

A liptinite nas amostras da Formação de Aituto são esporonite e telalginite (*Botryococcus* e acritarcas). Essas partículas apresentam uma fluorescência de cor amarelo alaranjado. Foram identificadas partículas de esporinite de pequenas dimensões (Figura 4.14A) com fluorescência de cor amarela a alaranjada. A presença de colónias de *Botryococcus* (Figura 4.14B)

indica ambientes de água doce a salobra (Pickel et al., 2017). Foram, ainda, identificadas partículas de microplâncton marinho de acritarcas (Figuras 4.14 C-F) na amostra GA_49_573. Essas partículas orgânicas foram, também, identificadas na lâmina de palinofácies (Figura 4.14 D e F) e são características de ambientes marinhos (Mendonça Filho & Gonçalves, 2017).

Estas características indicam que o tipo de cerogénio presente nestas amostras é um cerogénio de tipo III.

Para além da MO descrita foram observados produtos secundários, nomeadamente betumes sólidos. Estes betumes sólidos são interpretados como cimento orgânico ocorrendo a preencher os espaços vazios nos carbonatos. Os betumes sólidos são muito abundantes nas amostras dos afloramentos C, D, E e na amostra GA_49_573, justificando os teores mais elevados de COT nestas amostras, particularmente nas amostras do afloramento D e na amostra GA_49_573. Nas amostras dos afloramentos F e G estas partículas ocorrem em menores percentagens. Os betumes sólidos apresentam duas formas de ocorrência: dispersos na matéria mineral em partículas de dimensão muito pequena (Figura 4.15A); ou alinhados preenchendo fraturas ou outros espaços de espessuras variadas (Figura 4.15B a F).

Os betumes sólidos dispersos na matéria mineral, de pequenas dimensões, ocorrem essencialmente nas amostras do afloramento D e na amostra GA_49_573.

Relativamente à reflectância desta MO, considerou-se que há diferenças nos valores de reflectância medidos (Figuras 4.15 C e D). Os betumes sólidos que apresentam a reflectância mais baixa encontram-se na amostra FS3D no afloramento D (Figura 4.15 E). Em todas as amostras dos afloramentos desta formação foram identificados betumes sólidos com reflectância elevada.

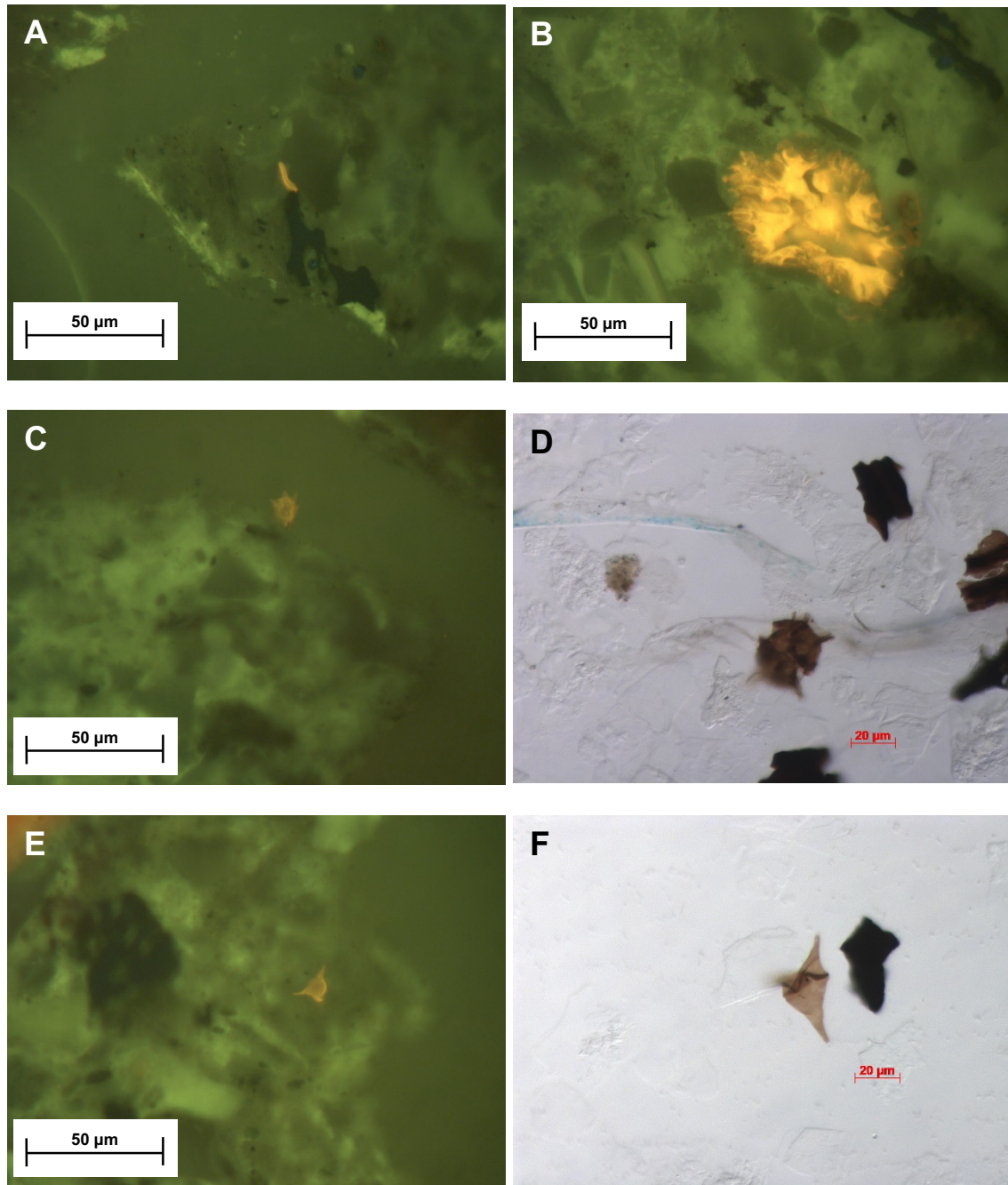


Figura 4. 14. Microfotografia dos aspectos de liptinite da Formação de Aituto.

Microfotografias A, B, C e E obtidas em luz azul incidente (fluorescência) em rocha total; D e F em luz branca transmitida em lâmina de palinofácies.

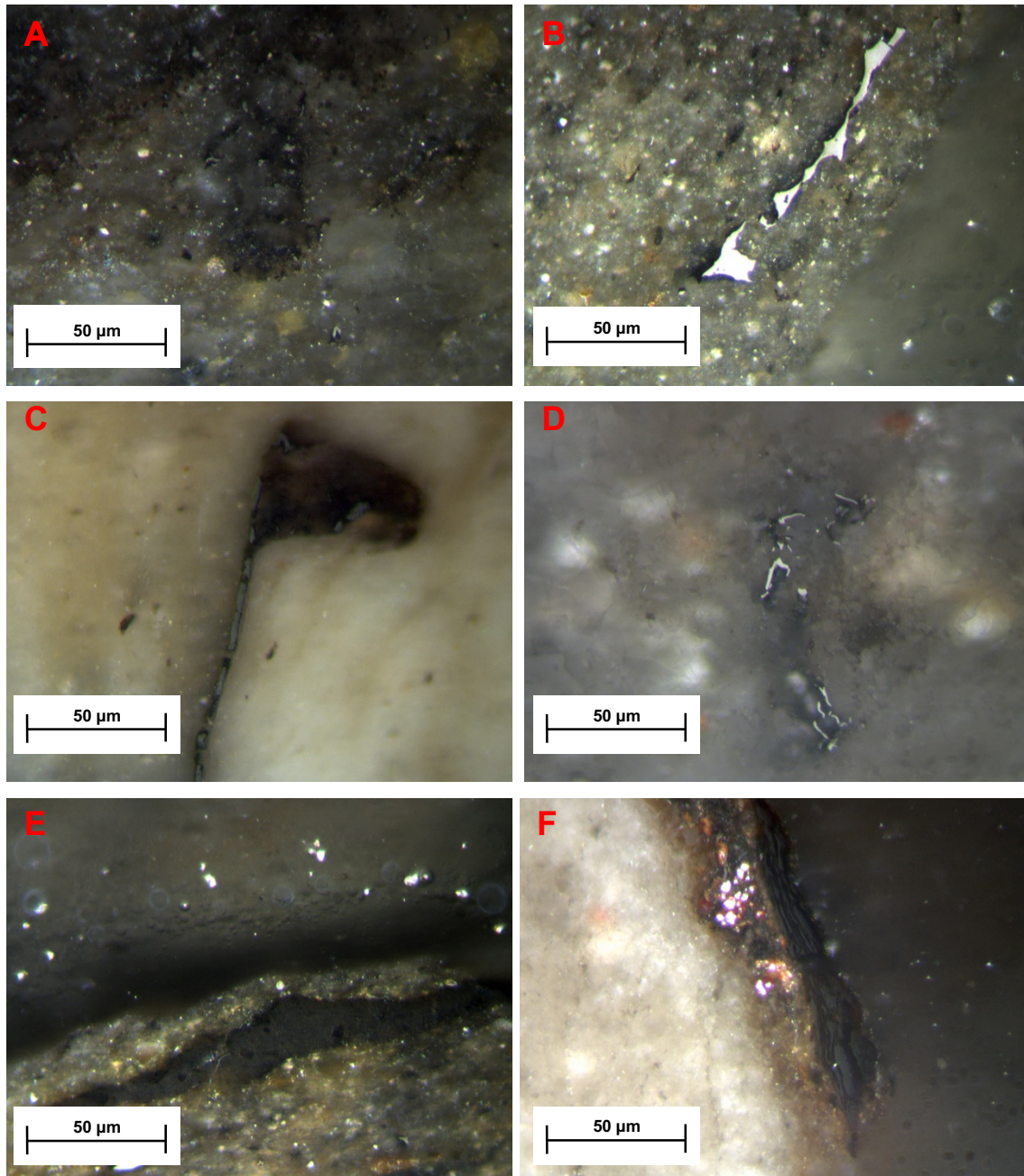


Figura 4. 15. Microfotografias de betumes sólidos na Formação de Aituto. A. Betumes sólidos dispersos na matéria mineral do afloramento E; B e E. Betumes sólidos alinhados de reflectância elevada do afloramento D; C. Betumes sólidos do afloramento H e D; E. Betumes sólidos do afloramento C; F. Betumes sólidos do afloramento F.

Microfotografias obtidas em luz branca reflectida.

Considerando a reflectância dos betumes sólidos foram identificadas amostras com uma família e outras com duas ou três famílias, nomeadamente:

- ✓ Nas amostras FS1H e FS2H do afloramento H observou-se apenas uma família de betumes sólidos. Na amostra FS1H a reflectância varia entre 1,0 a 1,2% (Figura 4.16A) e na amostra FS2H varia entre 0,9 a 1,4% (Figura 4.16B).
- ✓ Na amostra FS2C do afloramento C identificaram-se três famílias de betumes sólidos (Figura 4.16C). A família com menor reflectância varia entre 0,9% a 1,1%; apresentando as outras duas famílias reflectância que variam entre 1,3% a 1,7% e entre 2,0% a 2,1%, respectivamente;
- ✓ Nas amostras do afloramento D observaram-se duas e três famílias de betumes sólidos. Na amostra FS1D identificou-se três famílias (Figura 4.16D) com as seguintes reflectâncias: 0,7% a 1,0%; 1,1% a 2,0%; e, 2,1 a 2,5%. Na amostra FS3D identificaram-se duas famílias de betumes sólidos (Figura 4.16E): uma família com reflectância a variar entre 1,2% e 1,5% e outra família com reflectância a variar entre 1,7% a 2,0%.
- ✓ Na amostra FS3E do afloramento E observaram-se duas famílias de betumes sólidos (Figura 4.16F). Uma família de reflectância entre 1,4% a 1,7% e outra família com reflectância entre 2,0% a 2,1%.
- ✓ Na amostra GA_49_573 identificaram-se três famílias de betumes sólidos (Figura 4.16G), com reflectância a variar entre 0,5% a 0,6%; 0,8% a 1,4%; e, 1,8%.

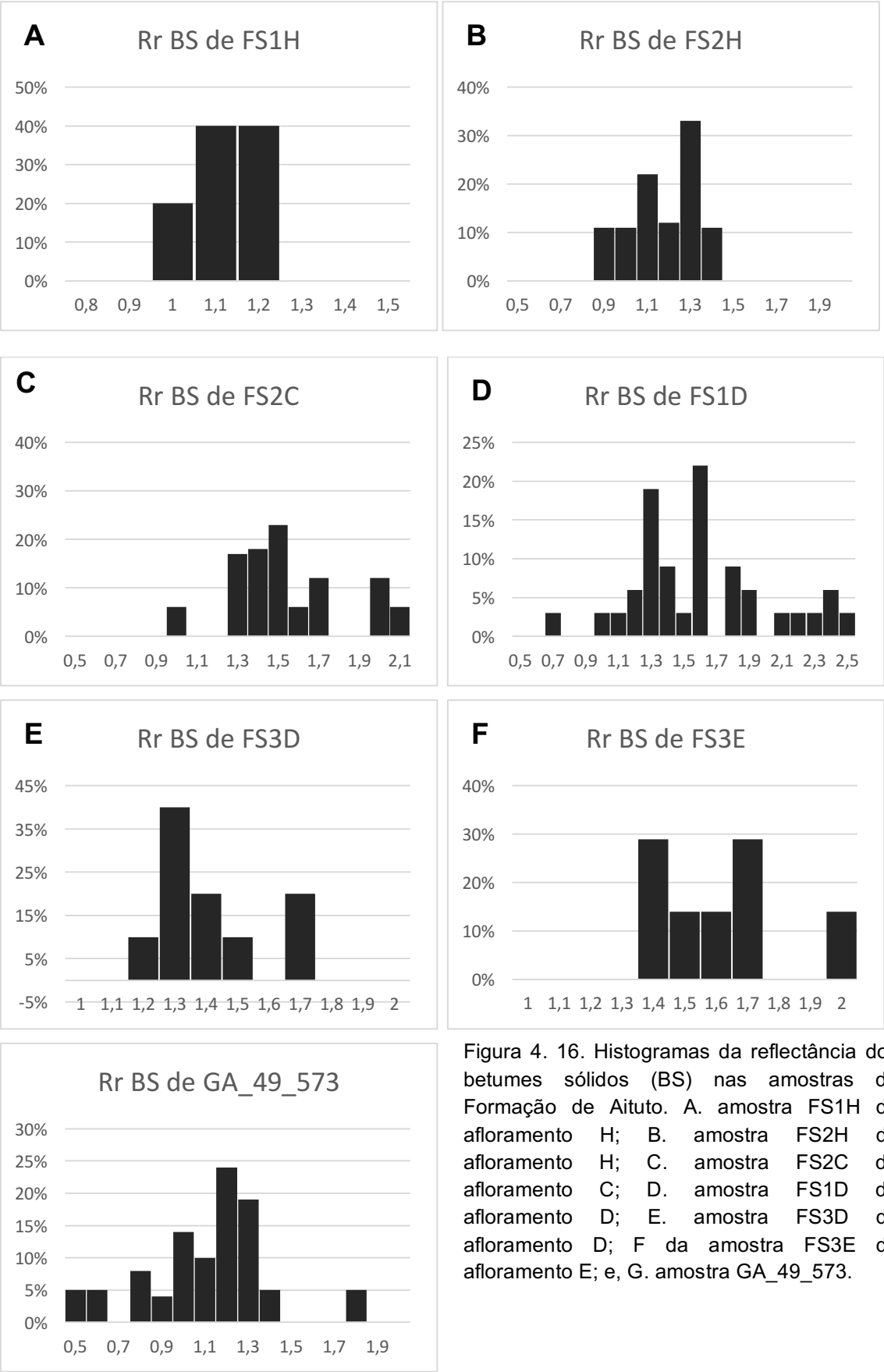


Figura 4. 16. Histogramas da reflectância dos betumes sólidos (BS) nas amostras da Formação de Aituto. A. amostra FS1H do afloramento H; B. amostra FS2H do afloramento H; C. amostra FS2C do afloramento C; D. amostra FS1D do afloramento D; E. amostra FS3D do afloramento D; F da amostra FS3E do afloramento E; e, G. amostra GA_49_573.

Para além da MO derivada de plantas terrestres, foi, também, identificada MO de origem animal (Figura 4.17). Na figura 4.17A a bifurcação simpodial parece indicar a presença de hidrozoários (Mendonça Filho et al., 2016). Por sua vez, na figura 4.17B, parece ser um foraminífero, que corresponde à película interna quitinosa que reveste a carapaça desse animal. A presença destes constituintes é indicativa de um ambiente marinho (Tyson, 1995). Também indicativos de ambientes marinhos são os quitinozoários identificados (Figura 4.17D) com a forma característica em garrafa tal como descritos para a Formação de Wailuli. Estes organismos são considerados como provenientes de retrabalhamento de formações do Devónico ou mais antigas (Mendonça Filho et al., 2014). Por último, foram identificadas estruturas em tubo (Figura 4.17C), também de origem animal, mas sem que seja possível indicar o tipo de organismo a que pertencem.

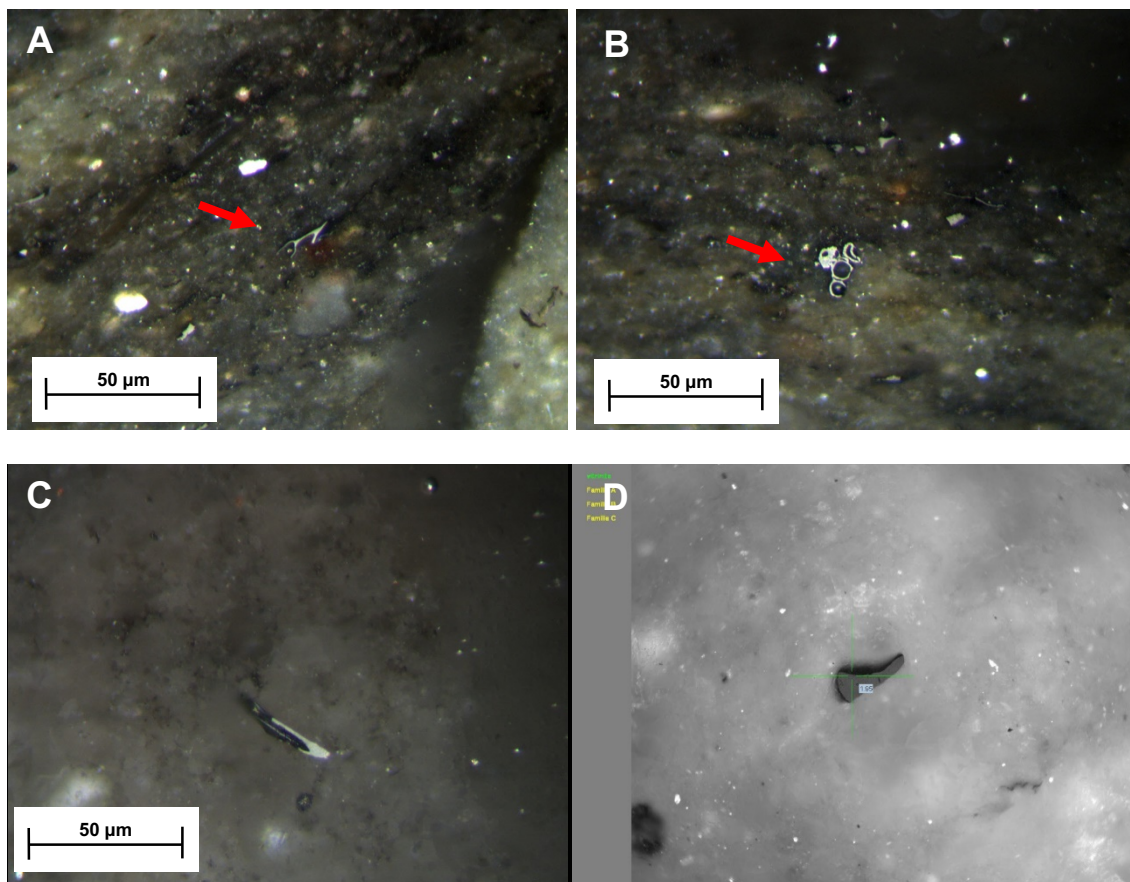


Figura 4.17. Microfotografias de zooclastos observadas na Formação de Aituto.

Microfotografias obtidas em luz branca reflectida.

A matéria mineral identificada nesta formação são carbonatos (dominantes), minerais de argila, pirite e óxido de ferro (Figura 4.18).

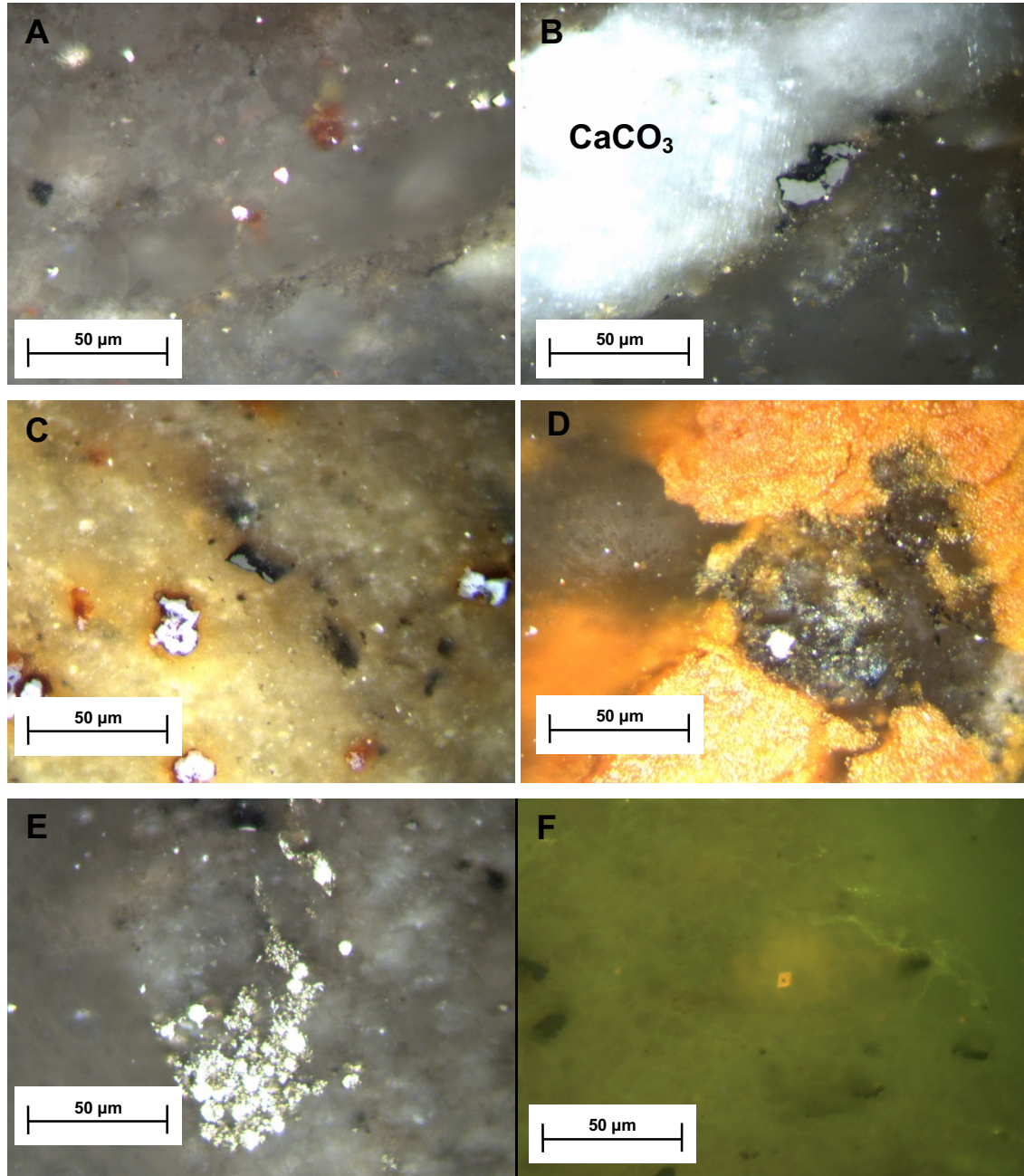


Figura 4.18. Microfotografias da matéria mineral da Formação de Aituto. A e B. Carbonatos; C. Minerais de argila, óxidos de ferro e pirite; D. Óxidos de ferro; E. Pirite framboidal; F. Romboedro de dolomite impregnado com hidrocarbonetos.

A a E microfotografias obtidas em luz branca reflectida; F microfotografia obtida em azul incidente (fluorescência).

Em luz branca os carbonatos apresentam tons cinzento claro e cinzento-escuro, tal como se observa na amostra FS1E na figura 4.18A. A calcite (CaCO_3) ocorre também em filonetos macroscopicamente observados nas amostras aquando da amostragem das mesmas. Esse material é de cor branca, brilhante e com reflexões internas com o aumento da intensidade de luz (Figura 4.18B). Os minerais de argila (Figura 4.18C) mostram tons amarelos forte a laranjados sem reflexões internas em luz branca refletida. Os óxidos de ferro (Figura 4.18D) encontrados em maior abundância nesta formação resultam, provavelmente da oxidação da pirite à superfície. A pirite ocorre com a forma framboidal (Figura 4.18E). Foram, ainda, identificados cristais euédricos de dolomite com a forma de romboedro impregnados com hidrocarbonetos responsáveis pela fluorescência que mostram (Figura 4.18F).

4.3.3. Formação de Cribas

As amostras da Formação de Cribas apresentam características essencialmente pelíticas ($\text{RI} > 85\%$). O teor de COT das amostras do afloramento B é semelhante e varia entre 0,34% e 0,43%. Por sua vez, a amostra AC_RH_WPT_034 apresenta um valor de COT mais elevado, de 0,77%.

Nas amostras estudadas da Formação de Cribas a vitrinite e a inertinite são considerados os grupos de macerais essenciais. Foram, ainda, identificados produtos secundários, betumes sólidos, e alguns zooclastos. Em geral, as partículas são pequenas ($10\ \mu\text{m}$) e apenas nalguns casos de grandes dimensões ($135\ \mu\text{m}$). Nas amostras do afloramento B, a vitrinite é o grupo de macerais mais abundante. Por sua vez, na amostra AC_RH_WPT_034 considerou-se a inertinite como o grupo de macerais mais frequente.

Deve-se, ainda, relatar que foi raro encontrar MO do grupo da liptinite nas amostras desta formação. As partículas identificadas em fluorescência eram de dimensão muito reduzida (liptodetrinite) e apresentavam intensidade de fluorescência muito baixa de cor alaranjada a acastanhada.

Nesta formação a vitrinite (Figura 4.19 A a C) apresenta forma variada (alongada, irregular e circular). A maioria das partículas mostra um aspecto

degradado (Figura 4.19 C) e sem estrutura celular. As partículas de menores dimensões estão alinhadas materializando uma laminação correspondente à estratificação (Figura 4.19B).

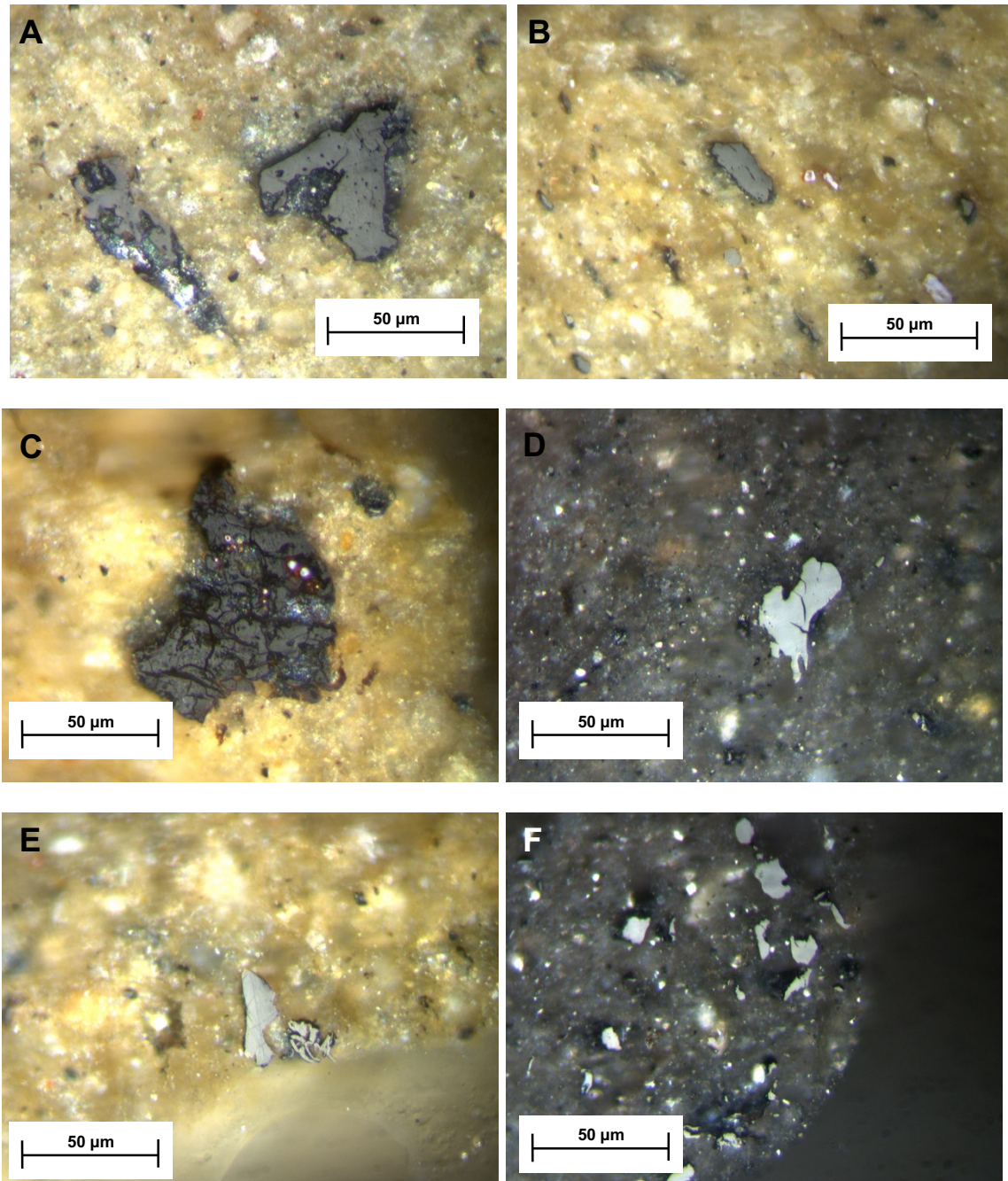


Figura 4.19. Microfotografias da vitrinite (A a C) e inertinite (D a F) no afloramento B da Formação de Cribas.

Microfotografias obtidas em luz branca reflectida.

A inertinite ocorre com tamanhos variados apresentando, na maioria, pequenas dimensões (menos de 20 µm), forma irregular (Figura 4.19D), por

vezes alongada (Figura 4.19E) a ligeiramente circulares (Figura 4.19F). A reflectância dessas partículas é elevada e apresentam superfície lisa.

Estas características indicam que o tipo de cerogénio presente nestas amostras é um cerogénio de tipo III.

Os betumes sólidos nesta formação são pouco frequentes e ocorrem em alinhamentos de espessura variada ocupando os espaços vazios da fracção inorgânica (Figura 4.20A-C).

A reflectância medida nos betumes sólidos nas amostras desta formação permitiu dizer o seguinte:

- ✓ Na amostra FS1B observou-se duas famílias de betumes sólidos (Figura 4.20D) com reflectância de 0,9% a 1,2% e de 1,8% a 2,0%;
- ✓ Na amostra FS2B observou-se apenas uma família de betumes sólidos com reflectância a variar entre 0,9% a 1,3% (Figura 4.20E);
- ✓ Na amostra FS4B identificaram-se duas famílias de betumes sólidos (Figura 4.20F) com reflectância entre 1,1% a 1,5% e outra entre 1,7% a 2,0%.
- ✓ Na amostra AC_RH_WPT_034 observou-se duas famílias de betumes sólidos (Figura 4.20G) com reflectância a variar entre 1,7% a 2,0% e outra família entre 2,1% a 2,3%.

A MO de origem animal nesta amostra é escassa, tendo sido identificadas estruturas tubulares (Figura 4.21A) e circulares (Figura 4.21B), não sendo possível a identificação do organismo a que pertencem.

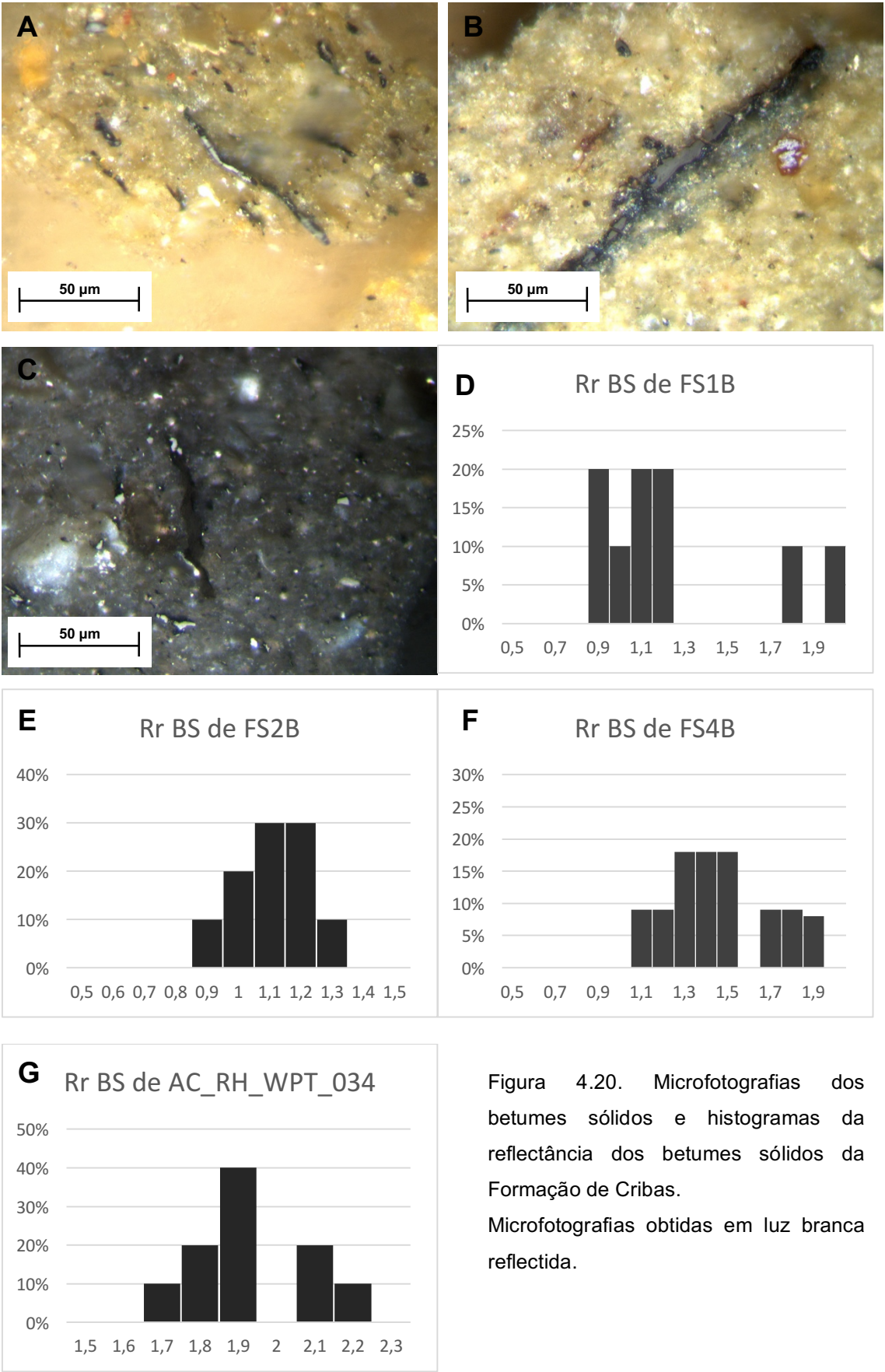


Figura 4.20. Microfotografias dos betumes sólidos e histogramas da reflectância dos betumes sólidos da Formação de Cribas. Microfotografias obtidas em luz branca reflectida.

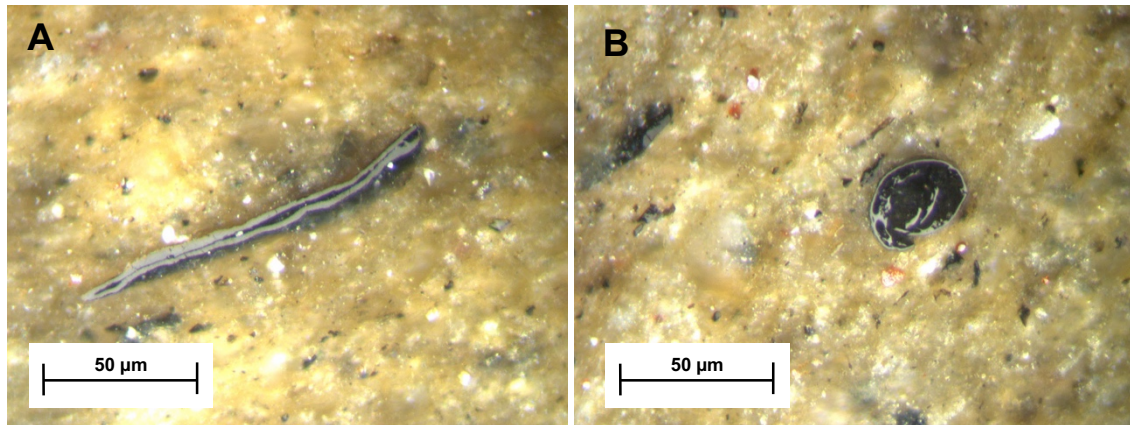


Figura 4. 21. Microfotografias de zooclastos da Formação de Cribas.

Microfotografias obtidas em luz branca reflectida.

Relativamente à matéria mineral das amostras estudadas, os minerais de argila são a matéria mineral predominante. Em luz branca refletida esses minerais apresentam cor alaranjada e sem reflexões internas (Figura 4.22A). Para além disso, os carbonatos, que ocorrem em pequena percentagem, apresentam tons cinzentos claros. Foi, ainda, identificada pirite framboidal (Figura 4.22B) e óxidos de ferro.

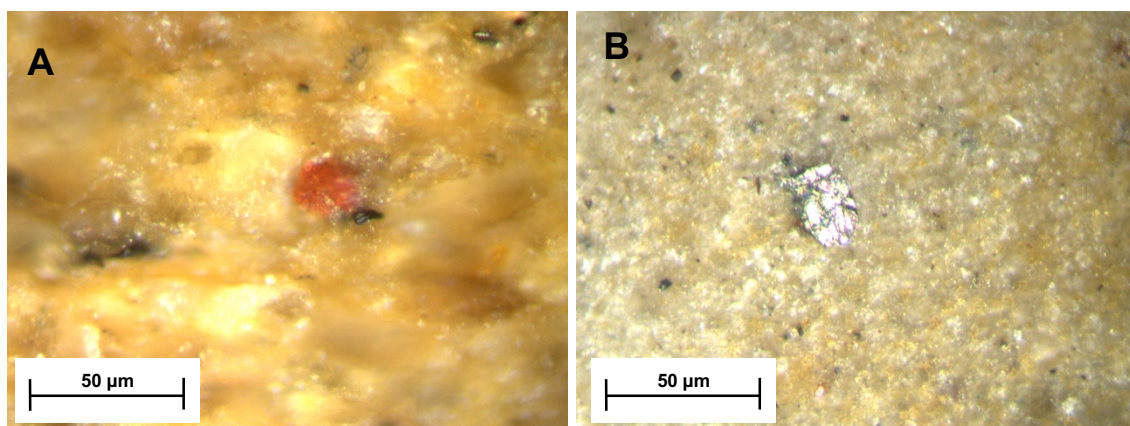


Figura 4.22. Microfotografia da matéria mineral da Formação de Cribas.

Microfotografias obtidas em luz branca reflectida.

4.3.4. Formação de Atahoc

Para esta formação foi estudada uma única amostra AC RH WPT 217. É uma amostra pelítica com um teor de COT de 0,34%. Nesta amostra identificaram-se os macerais dos grupos da vitrinite e da inertinite (Figura 4.23), sendo a vitrinite mais abundante do que inertinite. Tal como nas amostras das outras formações, foram, também, identificados betumes sólidos e zooclastos.

A vitrinite apresenta formas irregulares e alongadas (Figura 4.23A e B), de superfície irregular e por vezes porosa. Foram encontradas partículas de forma circular (Figura 4.23B) que parecem evidenciar que sofreram algum transporte. Por vezes a vitrinite ocorre com pirite framboidal intercrescida (Figura 4.23C). As partículas apresentam tamanhos variados e na maioria de pequenas dimensões (de entre 8 a 50 μm), sendo as partículas de tamanho médio (\geq de 100 μm) de forma alongada.

A inertinite (Figura 4.23D a F) apresenta tamanhos variados, mas na sua maioria de pequenas dimensões. As partículas estão constituídas por formas irregulares, algumas alongadas outras evidenciando estrutura celular (Figura 4.23D).

Estas características indicam que o tipo de cerogénio presente nestas amostras é um cerogénio de tipo III.

Identificaram-se, ainda, betumes sólidos que estão a preencher os espaços livres na fracção inorgânica. A maioria desses betumes sólidos a ocupar os espaços porosos da matéria mineral (Figura 4.24A e B). Foram considerados três famílias de betumes sólidos (Figura 4.24C) com reflectância de 1,3% a 1,5%; de 1,7% a 2,0% e de 2,2% a 2,5%.

Também foram identificadas partículas de origem animal cujas estruturas parecem indicar a presença de hidrozoários tal como descritas para as Formações de Wailuli e Aituto (Figuras 4. 25 A e B).

A matéria mineral nesta amostra inclui minerais de argila, pirite framboidal (Figura 4. 25C) e óxido de ferro (Figura 4. 25D).

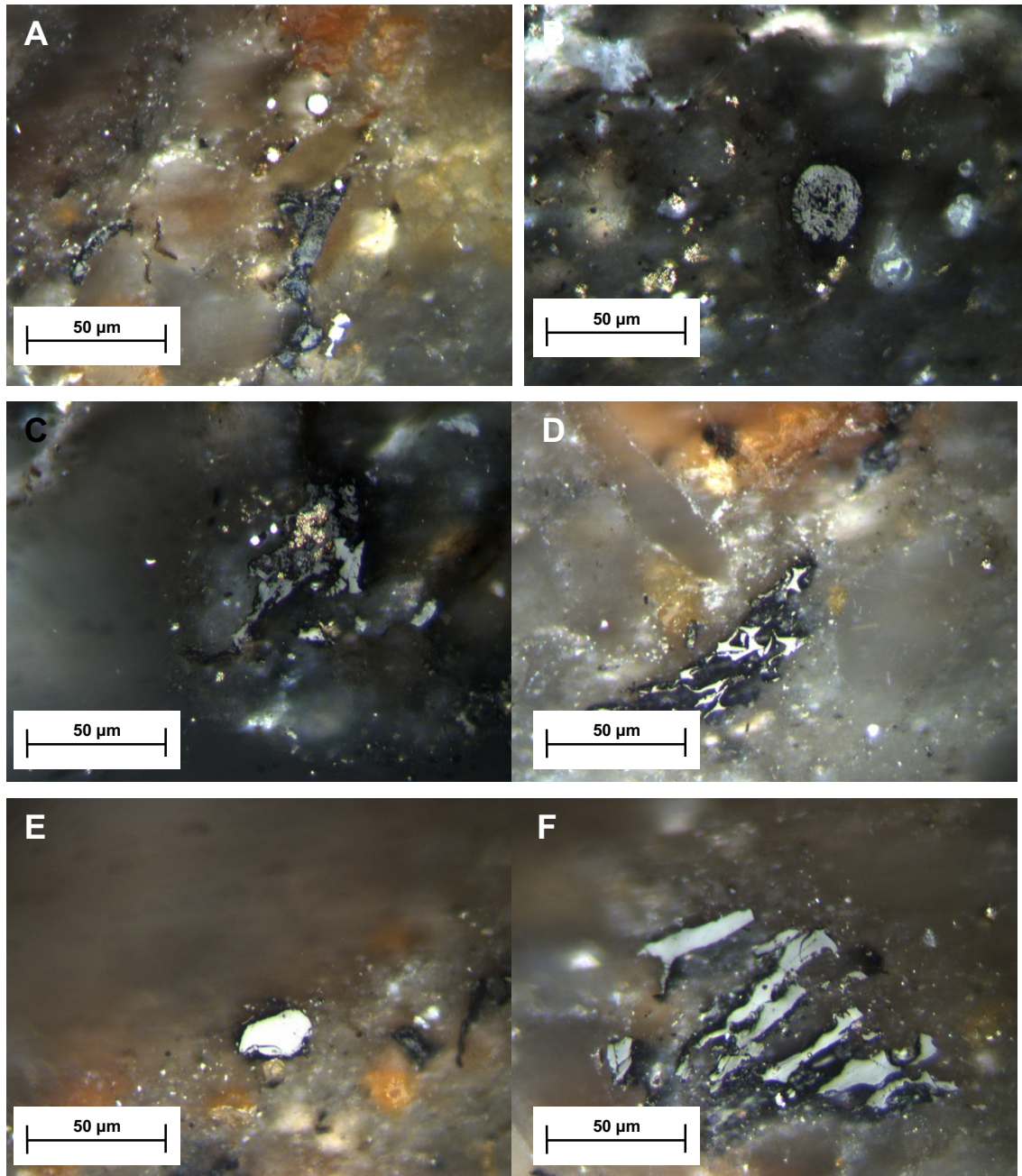


Figura 4.23. Microfotografias da vitrinite (A a C) e da inertinite (D a F) da Formação de Atahoc.

Microfotografias obtidas em luz branca reflectida.

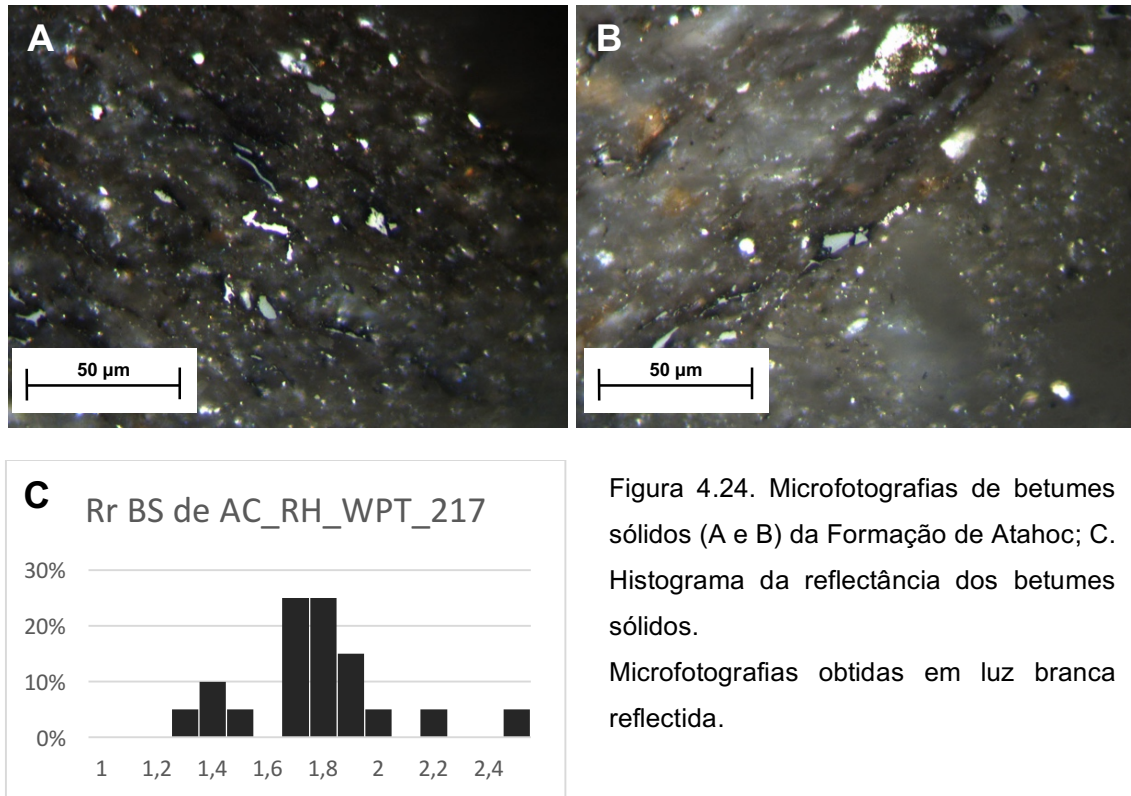


Figura 4.24. Microfotografias de betumes sólidos (A e B) da Formação de Atahoc; C. Histograma da reflectância dos betumes sólidos.

Microfotografias obtidas em luz branca reflectida.

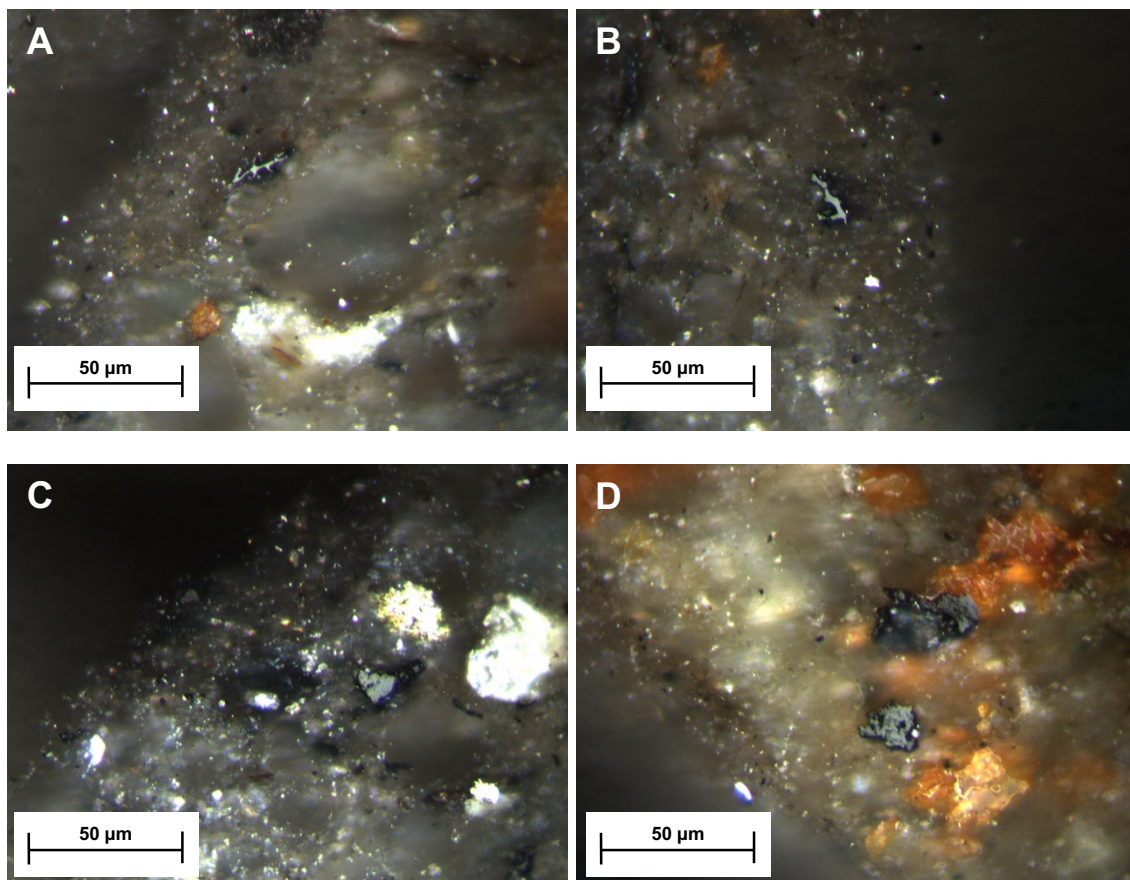


Figura 4. 25. Microfotografias de zooclastos (A e B) encontrados na Formação de Atahoc; C. pirite framboidal; F. Óxidos de ferro.

Microfotografias obtidas em luz branca reflectida.

4.4. Maturação da matéria orgânica

Este subcapítulo tem como objetivo avaliar o grau de maturação térmica de MO nas formações estudadas. A reflectância da vitrinite (Rr) é o melhor parâmetro para determinar ou avaliar a maturação térmica da MO tanto concentrada como dispersa (MOD) (Tissot & Welte, 1984), uma vez que a reflectância da vitrinite aumenta regularmente com o aumento da evolução térmica da MO.

Os resultados da reflectância da vitrinite das amostras estudadas estão indicados na tabela 4.3. Não foi possível medir a reflectância da vitrinite em todas as amostras por falta de partículas ou por apresentarem dimensão muito pequena.

Tabela 4.3. Resultados da reflectância da vitrinite das amostras estudadas.

Formação	Afloramento	Nº Amostra	Rr, %	Desvio padrão	Nº pontos medidos
Wailuli	A	FS1A	1,00	0,118	34
		FS2A	1,01	0,139	32
	I	FS1I	1,09	0,155	26
		FS2I	1,15	0,166	28
		FS3I	1,01	0,129	40
		AQ 04	1,23	0,158	36
Aituto	C	FS2C	1,61	0,173	59
	D	FS1D	1,63	0,160	29
		FS3D	1,61	0,160	29
	E	FS3E	1,93	0,185	35
	H	FS1H	1,35	0,101	46
		FS2H	1,32	0,112	52
		GA_49_573	1,53	0,160	59
Cribas	B	FS1B	1,43	0,181	34
		FS2B	1,20	0,073	50
		FS4B	1,56	0,193	37
		AC_RH_WPT_034	1,99	0,111	43
Atahoc		AC_RH_WPT_217	1,89	0,169	36

Os histogramas relativos às medidas efectuadas serão apresentados para cada formação. Em geral, os resultados da Rr da vitrinite variam entre 1,00% na amostra FS1A do afloramento A e 1,93% na amostra FS3E do afloramento E.

4.4.1. Formação de Wailuli

Nesta formação foram medidas as amostras de dois afloramentos (A e I) e a amostra AQ 04. A reflectância da vitrinite nesta formação varia entre 1,00% na amostra FS1A e 1,22% na amostra AQ 04. A reflectância da vitrinite medida em cada uma das amostras é a seguinte:

- ✓ Na amostra FS1A do afloramento A, a reflectância de vitrinite varia entre 0,7 a 1,1% (Figura 4.26A) com o valor médio de $R_r=1,00\%$;
- ✓ Na amostra FS2A a média da reflectância da vitrinite é igual à da amostra FS1A e varia entre 0,7% e 1,3% (Figura 4.26B);
- ✓ Na amostra FS1I do afloramento I a reflectância da vitrinite é ligeiramente superior à das amostras anteriores, variando entre 0,7% a 1,4% (Figura 4.26C) com a média de 1,09%.
- ✓ Na amostra FS2I do afloramento I a reflectância varia entre 0,9% a 1,5% (Figura 4.26D) sendo a média de 1,15%;
- ✓ Na amostra FS3I a reflectância da vitrinite varia entre 0,7% e 1,2% (Figura 4.26E) com a média de 1,01%.
- ✓ Na amostra AQ_04 a reflectância da vitrinite varia entre 0,9 a 1,4% (Figura 4.26F) sendo a média de 1,23%, correspondendo ao valor mais elevado medido na Formação de Wailuli.

Assim, estes valores de reflectância da vitrinite sugerem que a MO desta formação apresenta maturação térmica na fase da catagénese (Figura 1.2).

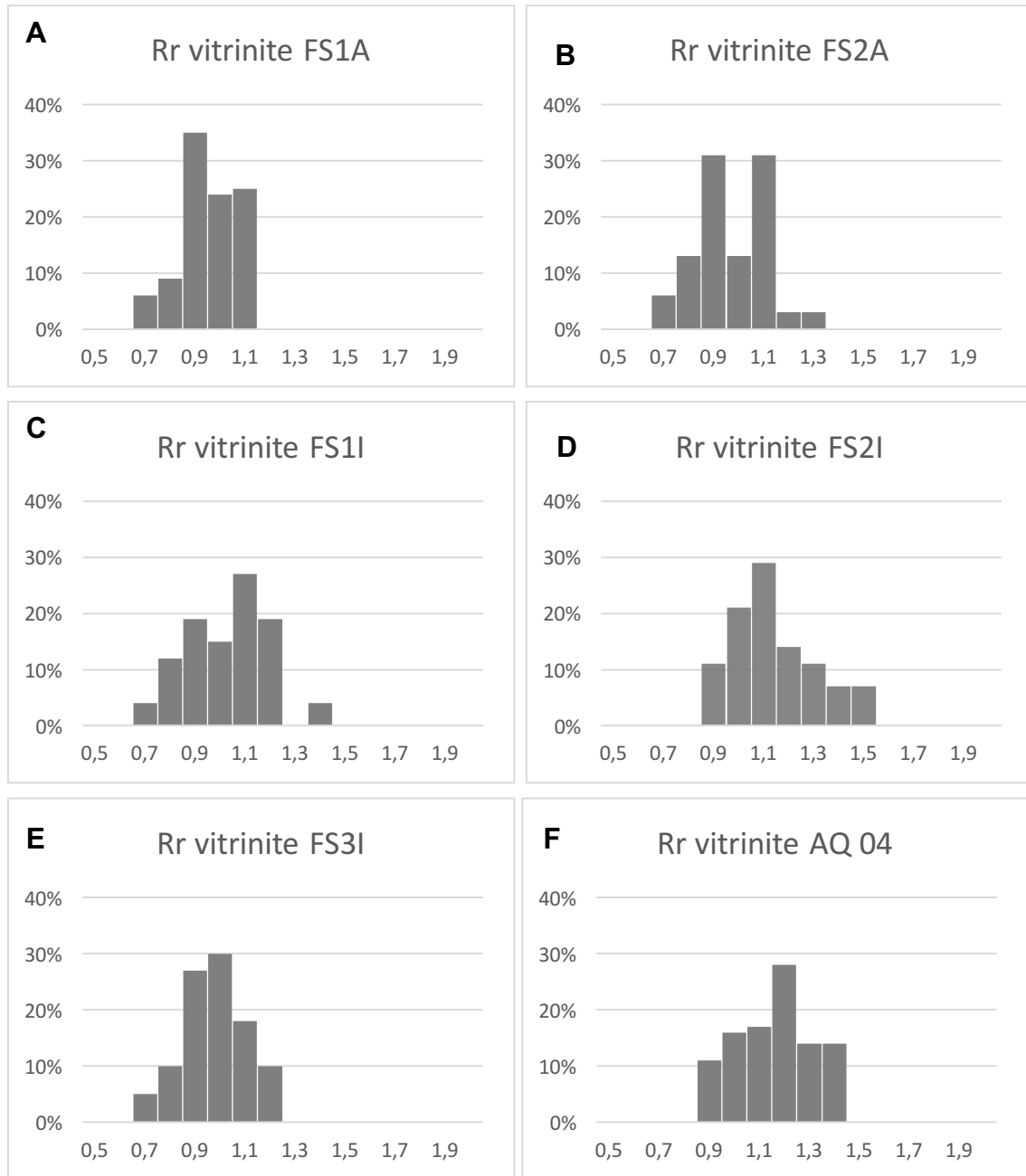


Figura 4.26. Histogramas da reflectância da vitrinite das amostras da Formação de Wailuli.

4.4.2. Formação de Aituto

Nesta formação foram medidas amostras dos afloramentos (C, D, E e H) e GA_49_573 (Tabela 4.3). Em média, a reflectância das amostras varia entre 1,32% a 1,93%.

- ✓ No afloramento C na amostra FS2C a reflectância varia entre 1,2% e 2,0% (Figura 4.27A) com a média de 1,61% (Tabela 4.3).
- ✓ A média da reflectância de vitrinite nas amostras do afloramento D são praticamente iguais à do afloramento C. Porém, os histogramas de reflectância são ligeiramente diferentes. Na amostra FS1D do afloramento D a reflectância de vitrinite varia entre 1,3 a 1,9% (Figura 4.27B) com a média de 1,63. Na amostra FS3D variar entre 1,3% e 1,9% (Figura 4.27C) com a média de 1,61% (Tabela 4.3).
- ✓ No afloramento E, a reflectância da vitrinite varia de 1,4% a 2,2% (Figura 4.27D) com a média mais elevada de 1,93% (Tabela 4.3). A amostra medida neste afloramento apresenta os valores de reflectância da vitrinite mais elevados de todas as amostras estudadas.
- ✓ No afloramento H, nas amostras FS1H e FS2H a reflectância de vitrinite é de 1,3%. Como pode ser observado nos histogramas (Figuras 4.27 E e F) os valores de reflectância varia entre 1,0% e 1,5% (Tabela 4.3).
- ✓ Na amostra GA_49_573 a reflectância da vitrinite varia entre 1,1% e 1,8% (Figura 4.27G) com a média de 1,53%.

Resumindo, a reflectância da vitrinite na Formação de Aituto é maior do que na Formação de Wailuli. Isso quer dizer que a maturação aumenta da Formação de Wailuli para Aituto sugerindo que este aumento está associado ao afundimento da sequência sedimentar e, por isso, obedecendo à Lei de Hilt (Taylor et al., 1998), isto é ao aumento da temperatura com a profundidade, designado por gradiente geotérmico.

Tal como a Formação de Wailuli, a maturação térmica da Formação de Aituto encontra-se na catagénese (Figura 1.2).

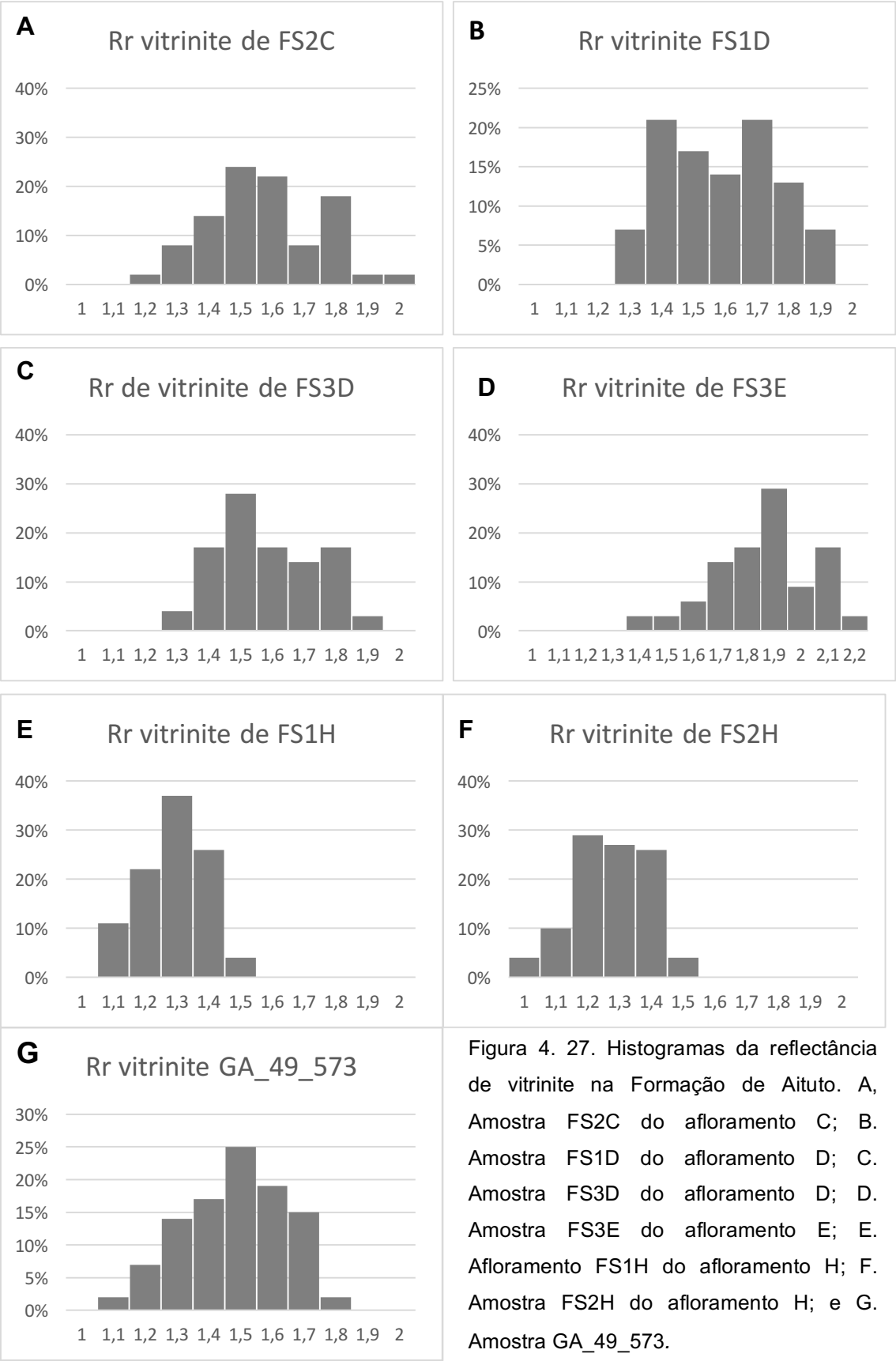


Figura 4. 27. Histogramas da reflectância de vitrinite na Formação de Aituto. A, Amostra FS2C do afloramento C; B, Amostra FS1D do afloramento D; C, Amostra FS3D do afloramento D; D, Amostra FS3E do afloramento E; E, Afloramento FS1H do afloramento H; F, Amostra FS2H do afloramento H; e G, Amostra GA_49_573.

4.4.3. Formação de Cribas

Nesta formação foram medidas as amostras do afloramento B e a amostra AC_RH_WPT_034. A média da reflectância da vitrinite nas amostras deste afloramento varia entre 1,20% na amostra FS2B e 1,99% na amostra AC_RH_WPT_034.

- ✓ Na amostra FS1B a reflectância da vitrinite varia no intervalo de 1,0% e 1,8% (Figura 4.28 A) com a média de 1,43%.
- ✓ Na amostra FS2B a reflectância da vitrinite varia entre 1,0% e 1,3% (Figura 4.28 B) com a média de 1,20%.
- ✓ Na amostra FS4B a reflectância da vitrinite varia de 1,1% e 1,8% (Figura 4.28 C) com a média de 1,56%.
- ✓ Na amostra AC_RH_WPT_034 a reflectância da vitrinite varia entre 1,6% a 2,1% (Figura 4.28 D) com a média de 1,99%.

Resumindo, a reflectância da vitrinite na Formação de Cribas é semelhante a ligeiramente superior à da Formação de Aituto sugerindo, tal como nas amostras das formações anteriores que a maturação térmica da MO se encontra na catagénese (Figura 1.2). Este grau de evolução da MO pode ser considerado como no início da formação de gás. No entanto, os baixos teores de COT não permitem a génese destes hidrocarbonetos.

4.4.4. Formação de Atahoc

A maturação térmica da MO nesta formação foi, também, avaliada através da reflectância da vitrinite na amostra AC_RH_WPT_217. A reflectância de vitrinite nesta amostra varia entre 1,5% e 2,2% (Figura 4.29) com a média de 1,89% (Tabela 4.3).

Com este valor considera-se que a MO está no limite da fase da catagénese e está maduro para geração de gás húmido e seco.

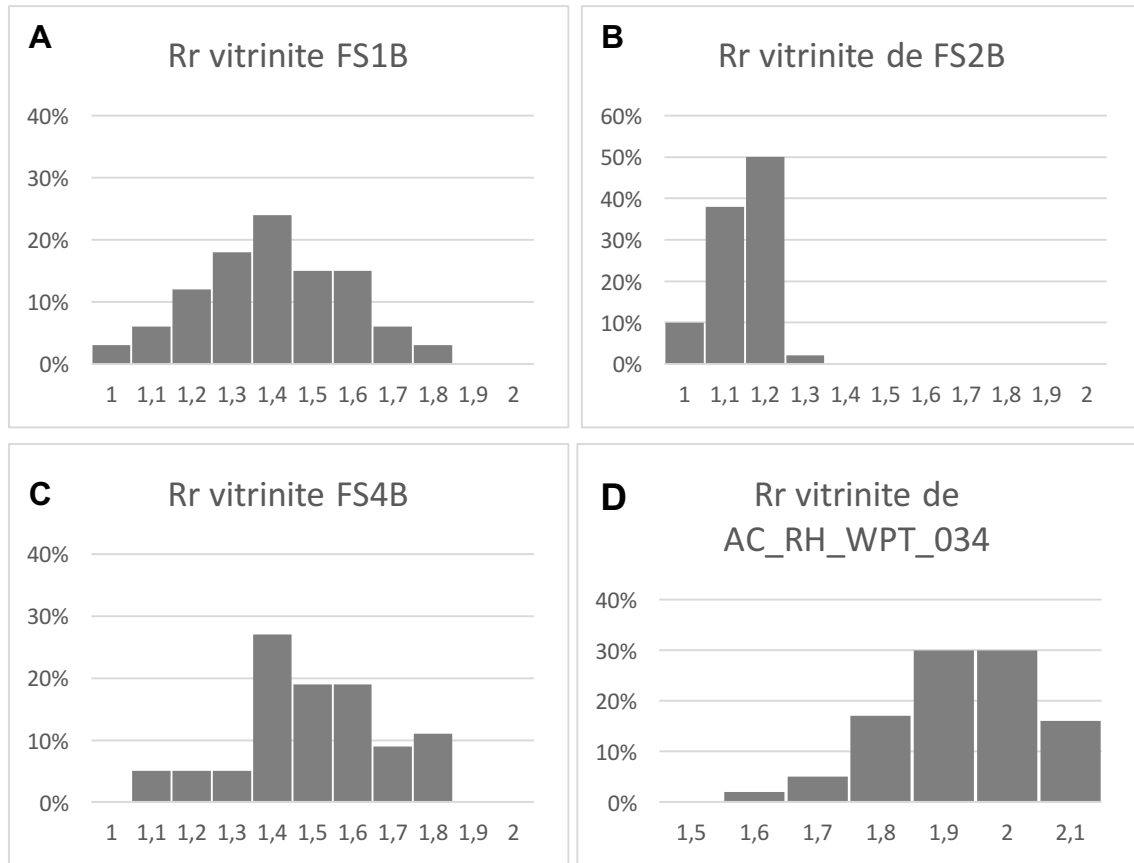


Figura 4.28. Histogramas da reflectância da vitrinite das amostras na Formação de Cribas.

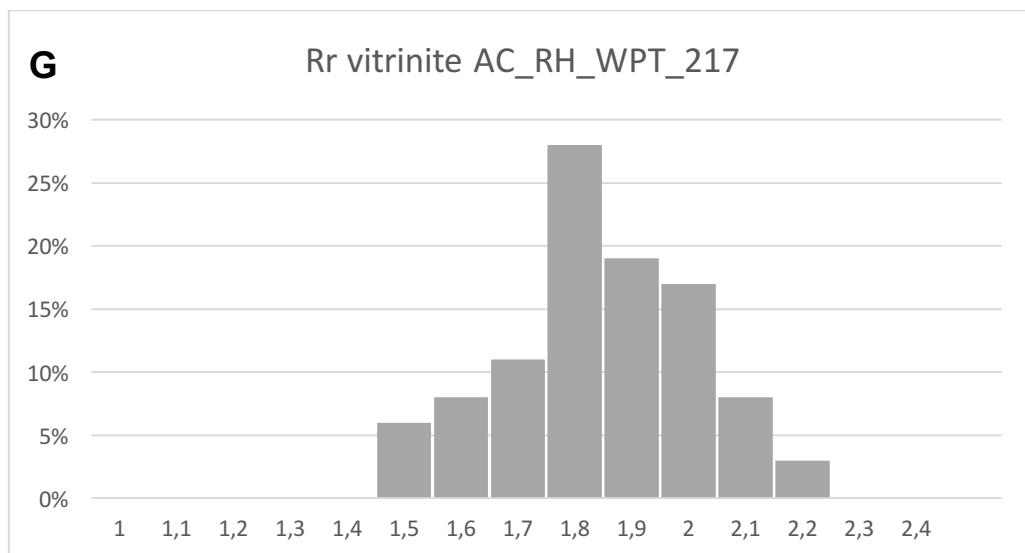


Figura 4.29. Histograma da reflectância da vitrinite na amostra AC_RH_WPT_217 da Formação de Atahoc.

Capítulo 5 - Considerações finais

Os afloramentos da Formação de Wailuli compreendem bancadas espessa de argilitos com a alternância de camadas pouco espessas de calcário, arenito e calcoarenítico. As amostras colhidas nesta formação apresentam cor cinzento-escura a clara e calcários esverdeados. A granulometria das amostras é fina a muito fina. Os afloramentos na Formação de Aituto têm um carácter mais carbonatado com bancadas espessas de calcários e a alternância de xistos argilosos laminados. As amostras nesta formação apresentam cores escuras e cinzentas mais claras. A granulometria das amostras é mais fina do que na formação anterior, apresentando fraturas preenchidas com filonetes de calcite. Na Formação de Cribas o afloramento é constituído por xistos argilitos de cor cinzenta com intercalações de arenitos no topo. As amostras apresentam vestígios de meteorização química pelo facto de terem sido colhidas em afloramento. Na Formação de Atahoc considerou-se uma amostra de características pelíticas.

As amostras estudadas são pobres em MO devido aos baixos teores de COT. A MO particulada é, nas quatro formações estudadas constituída maioritariamente por macerais dos grupos da vitrinite e da inertinite. A vitrinite é constituída por materiais gelificados, tendo sido identificadas partículas retrabalhadas. A inertinite é essencialmente detrítica e ocasionalmente apresentando estrutura celular. O grupo da liptinite é escasso e está representado pela esporonite, cutinite, lamalginite e telalgenite (*Botryococcus* e acritarcas), apresentando fluorescência fraca e de cor amarelo dourado a alaranjada.

Foram identificados, ainda que em pequenas percentagens, MO de origem animal como zooclastos e zoomorfos, nomeadamente restos de hidrozoários, quitinizoários e foraminíferos. A presença de quitinizoários é indicativa de MO retrabalhada de formações mais antigas de idade anterior ao Devónico.

Em todas as formações estudadas ocorrem betumes sólidos a preencher espaços livres nas fracções inorgânicas. A reflectância dos betumes sólidos permitiram identificar, em alguns casos, 2 e 3 famílias sendo consideradas, de acordo com a classificação de Jacob (1989), como epi-impsonite e meta-impsonite. Em alguns casos, a presença dos betumes sólidos é responsável pelo aumento do teor de COT.

A MO na sequência estudada é essencialmente de origem continental proveniente de plantas terrestre e considerada como cerogénio tipo III. A MO foi preservada em ambientes essencialmente redutores, quer pela presença de materiais essencialmente gelificados quer, também, pela presença de pirite framboidal.

A maturação térmica da MO da sequência sedimentar estudada, avaliada através da reflectância da vitrinite, indicou que globalmente foi atingida devido ao afundimento da sequência sedimentar como consequência do aumento da temperatura com a profundidade, devido ao aumento do gradiente geotérmico. Todas as formações encontram-se na fase de maturação térmica da catagénese.

Os baixos teores de COT, associados à maturação térmica da MO e à presença de betumes sólidos indicam que estas formações poderão ter produzido petróleo, sendo que a MO presente se considera residual.

O facto de a maturação térmica estar dentro da catagénese e a MO ser um cerogénio tipo III, poderia indicar boas condições para a produção de gás. Porém, os teores de COT não são suficientes para a produção deste tipo de hidrocarbonetos.

Trabalhos Futuros

As formações estudadas são importantes para avaliar e classificar a MO, para prever e avaliar a geração de hidrocarbonetos. As análises petrográficas e geoquímicas são fundamentais para complementar os conhecimentos atuais relativamente à prospecção dos hidrocarbonetos desta sequência sedimentar. Assim, seria importante estudar mais amostras provenientes de afloramentos recentes para evitar os efeitos da meteorização, com maior quantidade de MO e, idealmente, realizar uma campanha de sondagem atravessando as Formações de Wailuli, Aituto, Cribas e Atahoc para estudos de mais pormenor. Como nas quatro formações estudadas ocorrem betumes sólidos, no trabalho próximo seria importante explorar mais informações valiosas para a exploração dos hidrocarbonetos.

Referências bibliografias

- ASTM, 2014. D7708-14. Standard test method for microscopical determination of the reflectance of vitrinite dispersed in sedimentary rocks. Annual book of ASTM standards: petroleum products, lubricants, and fossil fuels; gaseous fuels; coal and coke, sec. 5, v. 5.06. ASTM International, West Conshohocken, PA, pp. 823–833.
- Audley-Charles, M.G., 1968. The Geology of Portuguese Timor. Geological Society London Memoirs 4, 1–76.
- Biju-Duval, B., 2002. Sedimentary geology: sedimentary basins, depositional environments, petroleum formation. Editions Technip. 642 pp.
- Caldeira, J., Rosário, D., Lopes, S., Mendes, H., 2013. Manatuto em Numeros: Estatística Municipio de Manatuto 2013. Direção Geral de Estatística Timor Leste.
- Carvalho, J., Lisboa, V., 2003. Breve panorâmica sobre os recursos geológicos não metálicos de Timor Leste. In: VI Congresso Nacional de Geologia, 4 a 6 de Junho de 2003.
- Charlton, T.R., 2002. The petroleum potential of East Timor. Australian Petroleum Production and Exploration Association Journal, 42, 351-369.
- Charlton, T.R., Barber, A.J., Harris, R.A., Barkham, S.T., Bird, P.R., Archbold, N.W., Morris, N.J., Nicoll, R.S., Owen, H.G., Owens, R.M., Sorauf, J.E., Taylor, P.D., Webster, G.D., Whittaker, J.E., 2002. The Permian of Timor: stratigraphy, palaeontology and palaeogeography. Journal of Asian Earth Sciences 20, 719-774.
- Charlton, T.R., Barber, A.J., McGowan, A.J., Nicoll, R.S., Roniewicz, E., Cook, S.E., Barkham, S.T., Bird, P.R., 2009. The Triassic of Timor: Lithostratigraphy, chronostratigraphy and paleogeography. Journal of Asian Earth Sciences 36, 341-363.
- Coe, A., Argles, T., Rothery, D., Spicer, R., 2010. Geological Field Techniques. Chichester: Wiley Blackwell. 323 pp.

- Dias, R., Nogueira, P., Ferreira, V., Oliveira, G., 2013. Tectónica transcorrente em colisões Arco – Continental; o exemplo de Timor Leste. Grupo de Geologia Estrutural e Tectónica. Universidade de Évora.
- Flores, D., Suárez-Ruiz, I., 2017. Organic petrology in the study of dispersed organic matter. In: Suárez-Ruiz, I., Mendonça Filho, J.G., (Eds.), The role of Organic Petrology in the Exploration of Conventional and Unconventional Hydrocarbons Systems. Bentham Science Publishers, Vol. 1, 34-76.
- Hall, R., 2011. Australia–SE Asia collision: plate tectonics and crustal flow. In: Hall, R., Cottam, M A., Wilson, M.E.J. (Eds) The SE Asian Gateway: History and Tectonics of the Australia–Asia Collision. Geological Society, London, Special Publications, 355, 75-109.
- ICCP-TSOP Classification, 2002. Status Report on TSOP-ICCP Dispersed Organic Matter Classification Working Group. The Society for Organic Petrology Newsletter 19, 14-15.
- International Committee for Coal and Organic Petrology (ICCP), 1998. The new vitrinite classification (ICCP System 1994). Fuel 77, 349-358.
- International Committee for Coal and Organic Petrology (ICCP), 2001. The new inertinite classification (ICCP System 1994). Fuel 80, 459-471.
- ISO 7404-2, 2009. Methods for the petrographic analysis of coals - Part 2: Methods of preparing coal samples. International Organization for Standardization, 12 pp.
- Jacob, H., 1989. Classification, structure, genesis and practical importance of nature solid oil bitumen (“migrabitumen”). International Journal of Coal Geology 11, 65-79.
- Jahn, F., Cook, M., Graham, M., 2012. Exploração e produção de hidrocarbonetos. Elsevier Editora Ltda. Rio de Janeiro Campus. 491 pp.
- Larsen, G., Chilingar, G.V., 1979. Introduction-diagenesis of sediments and rocks. Developments in Sedimentology 25, 1-29.

- Leme, A., 1968. Breve ensaio sobre a geologia da província de Timor. Curso sobre a geologia do ultramar. Junta de Investigações do Ultramar 1, 106-161.
- Lopes, L., Cristovão, N., Cristovão, H., Nogueira, P., Rebola, P., 2012. Rochas Ornamentais de Timor Leste.
- Mendonça Filho, J.G., 2010. Geoquímica do Petróleo. In: Flores, D., Marques, M., (Eds.), XVI Semana de Geoquímica/X Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa, Porto, Memórias 16, 3-56.
- Mendonça Filho, J.G., Gonçalves, P.A., 2017. The sedimentary organic matter, Chapter 1. In: I. Suárez-Ruiz, J.G. Mendonça Filho (Eds.). The Role of Organic Petrology in the Exploration of Conventional and Unconventional Hydrocarbon Systems. Bentham Science Publishers, United Arab Emirates, Vol. 1, 1-33.
- Mendonça Filho, J.G., Menezes, T.R., Mendonça, J.O., 2014. Organic Composition (Palynofacies Analysis). In: ICCP Training Course on Dispersed Organic Matter. 7th Course in Organic Matter. GFZ, Potsdam, Germany, 35-84.
- Mendonça Filho, J.G., Oliveira, A.D., Souza, J.T., Mendonça, J.O., Flores, D., 2016. The fossil record of hydrozoans in dispersed organic matter: a palynofacies and organic petrographic approach to kerogen characterization. ICCP Program & Abstract Book. 68th Joint Meeting of the International Committee for Coal and Organic Petrology, the Society for Organic Petrology and the Palynological Society, 84-86.
- Nogueira, P., 2010. Geologia de Timor-Leste: Uma breve introdução histórico-bibliográfica. Actas X Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa/XVI Semana de Geoquímica, Porto, Resumos e CD, pp. 35-42.
- Nogueira, P., 2012. Catálogo de rochas de Timor-Leste. Ficha técnica. Disponível em: <https://dspace.uevora.pt/rdpc/bitstream/10174/8312/1/Cat%C3%A1logo>

%20de%20rochas%20ornamentais%20timorenses.pdf) consultado em 07/01/2017.

- Pickel, W., Kus, J., Flores, D., Kalaitzidis, S., Christanis, K., Cardott, B. J., Miszkennan, M., Rodrigues, S., Hentschel, A., Hamor-Vido, M., Wagner, N., Crosdale, P., ICCP, 2017. Classification of liptinite–ICCP System 1994. *International Journal of Coal Geology* 169, 40-61.
- Spencer, C.J., Harris, R.A., Major, J.R., 2016. Provenance of Permian–Triassic Gondwana Sequence units accreted to the Banda Arc in the Timor region: Constraints from zircon U–Pb and Hf isotopes. *Gondwana Research* 38, 28-39.
- Taylor, G.H., Teichmüller, M., Davis, A., Diessel, C.F.K., Littke, R., e Robert, P., 1998. *Organic Petrology*. Bornträger, Berlin, Stuttgart. 704 pp.
- Tissot, B., Welte, D., 1984. *Petroleum formation and occurrence*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH. 699 pp.
- Tyson, R.V., 1995. *Sedimentary Organic Matter: Organic Facies and Palynofacies*. Chapman and Hall, London. 615 pp.
- United Nations, 2003. *Economic and Social Commission for Asia and the Pacific. Atlas of Mineral Resources of the ESCAP Region. Geology and mineral resources of Timor-Leste*. Vol. 17. pp. 1 – 177.

Anexo 1

I. Resumo publicado no âmbito das Jornadas do ICT 2017

Petrologia e geoquímica orgânicas da Formação de Wailuli (Timor-Leste): Resultados preliminares

da Silva, F.O.¹, Gonçalves, P.A.¹, Mendonça Filho, J.G.², Mendonça, J.O.², Nogueira, P.³, Flores, D.¹

¹ Instituto de Ciências da Terra – Polo da Universidade do Porto e Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, up201204725@fc.up.pt

² Laboratório de Palinofácies e Fácies Orgânicas (LAFO), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil.

³ Instituto de Ciências da Terra – Polo da Universidade de Évora.

A ilha de Timor resultou da colisão de placa Australiana com o arco da Banda. O território é designado de pequena sonda, fazendo parte do designado arco exterior de Banda, de natureza não vulcânica. Segundo alguns autores as unidades autóctones da ilha correspondem ao bordo noroeste da plataforma continental Australiana (Hall, 2011). O território é constituído maioritariamente por rochas sedimentares depositadas nessa plataforma continental.

Neste trabalho, pretende-se apresentar os primeiros dados relativos à caracterização petrográfica e geoquímica da matéria orgânica (MO) da Formação de Wailuli. Esta Formação foi definida por Audley-Charles (1968) e é faz parte do conjunto de unidades para autóctones definidas por este autor. Esta formação, de idade Triásico Superior-Jurássico, é uma espessa sequência de argilitos com intercalações de margas laminadas, calcilutitos, argilitos micáceos e arenitos quártzicos. Para o topo da formação ocorrem conglomerados e argilitos vermelhos (Spencer et al., 2016). Esta sequência depositou-se num

ambiente marinho raso como indica a presença de pisólitos com algas, oólitos e bioclastos.

A área em estudo está localizada na parte central do território, sendo parte do distrito de Manatuto. Foram colhidas 8 amostras em três afloramentos (afloramento A, I e J) ao longo da estrada de ligação entre Manatuto e Laclubar. As amostras foram preparadas para análises de petrologia orgânica (lâmina de palinofácies e rocha total) e para a determinação de teor em carbono orgânico total (COT), enxofre total (St) e teor em carbonato de cálcio (CaCO_3), seguindo métodos normalizados (ISO 7404-2) ou descritos em Mendonça Filho et al. (2014). A classificação e nomenclatura usadas na descrição da MO em palinofácies e em rocha total são as descritas por Mendonça Filho et al. (2014) e a do ICCP (ICCP, 1998, 2001; Classificação ICCP-TSOP, 2002), respetivamente.

Os valores de COT variam entre 0,05wt.% e 0,88wt.% indicando que as amostras são muito pobres em MO como resultado da fraca deposição e/ou preservação. O St é baixo (0,1wt.%) e o CaCO_3 oscila entre 25% e 7%, evidenciando o carácter pelítico da sequência, apesar de uma amostra do afloramento A apresentar o valor mais elevado de 46%.

A análise de palinofácies mostrou um predomínio de fitoclastos não opacos não bioestruturados (MO de origem continental), por vezes degradados, o que está de acordo com a fraca preservação da MO particulada. Foram, ainda, identificadas partículas de betumes sólidos, opacos e de pequena dimensão. A ocorrência de zooclastos, também de dimensão reduzida, foi notada.

A fração orgânica identificada na rocha total é constituída por macerais predominantemente dos grupos da vitrinite e da inertinite. Nas amostras dos afloramentos I e A identificaram-se, também, betumes sólidos a preencher espaços vazios na fração inorgânica e zooclastos. De notar a ocorrência de várias famílias de betumes sólidos com diferentes aspetos petrográficos e reflectância variável. As partículas de vitrinite apresentam formas e tamanhos variados, superfícies irregulares e, por vezes, com fraturas perpendiculares ao alongamento da partícula. A reflectância da vitrinite varia entre 0.7% e 1.5%,

apresentando, na sua maioria, valores de 1,0%. Estes valores de reflectância da vitrinite sugerem que a MO desta formação apresenta maturação térmica na fase da ciagenese.

Palavras-chave: Timor-Leste, Formação de Wailuli, COT, Petrografia Orgânica.

Referências

Audley-Charles, M.G., 1968. The Geology of Portuguese Timor. Geological Society London Memoirs 4, 1–76.

Hall, R., 2011. Australia–SE Asia collision: plate tectonics and crustal flow. In: Hall, R., Cottam, M A., Wilson, M.E.J. (Eds) The SE Asian Gateway: History and Tectonics of the Australia–Asia Collision. Geological Society, London, Special Publications, 355, 75-109.

ICCP-TSOP Classification, 2002. Status Report on TSOP-ICCP Dispersed Organic Matter Classification Working Group. The Society for Organic Petrology Newsletter 19, 14-15.

International Committee for Coal and Organic Petrology (ICCP), 1998. The new vitrinite classification (ICCP System 1994). Fuel 77, 349-358.

International Committee for Coal and Organic Petrology (ICCP), 2001. The new inertinite classification (ICCP System 1994). Fuel 80, 459-471.

ISO 7404-2, 2009. Methods for the petrographic analysis of coals - Part 2: Methods of preparing coal samples. International Organization for Standardization, 12 pp.

Mendonça Filho, J.G., Menezes, T.R., Mendonça, J.O., 2014. Organic Composition (Palynofacies Analysis). In: ICCP Training Course on Dispersed Organic Matter. 7th Course in Organic Matter. GFZ, Potsdam, Germany, 35-84.

Spencer, C.J., Harris, R.A., Major, J.R., 2016. Provenance of Permian–Triassic Gondwana Sequence units accreted to the Banda Arc in the Timor region: Constraints from zircon U–Pb and Hf isotopes. Gondwana Research 38, 28-39.

II. Poster apresentado nas Jornadas do ICT 2017



FCT
Fundação para a Ciência e a Tecnologia

JORNADAS DO ICT

26 e 27 de junho de 2017 • Universidade do Minho

PETROLOGIA E GEOQUÍMICA ORGÂNICAS DA FORMAÇÃO DE WAILULI (TIMOR-LESTE): RESULTADO PRELIMINARES

da Silva, F.O.¹, Gonçalves, P.A.¹, Mendonça Filho, J.G.², Mendonça, J.O.², Nogueira, P.³, Flores, D.¹

¹ Instituto de Ciências da Terra – Polo da Universidade do Porto e Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, ²up201204725@fc.up.pt;

² Laboratório de Palinofácies e Fácies Orgânicas (LAFO), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil. ³ Instituto de Ciências da Terra – Polo da Universidade de Évora.

INTRODUÇÃO

A petrografia e a geoquímica orgânica são ferramentas importantes no estudo da matéria orgânica (MO) dispersa em sedimentos. A caracterização da MO é de considerável importância pois contribui para o seu conhecimento permitindo determinar potenciais rocha geradora de hidrocarbonetos. Este tipo de estudos ganha maior importância em países como Timor-Leste onde, apesar de ser rico em hidrocarbonetos, o seu sistema petrolífero ainda é desconhecido.

Neste trabalho, pretende-se apresentar os primeiros dados relativos à caracterização petrográfica (rocha total e palinofácies) e geoquímica da matéria orgânica (MO) da Formação de Wailuli da Bacia de Cribas (Timor-Leste).

ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO

A ilha de Timor resultou da colisão de placa Australiana com o arco da Banda. O território é designado de pequena sonda, fazendo parte do designado arco exterior de Banda, de natureza não vulcânica. Segundo alguns autores as unidades autóctones da ilha correspondem ao bordo noroeste da plataforma continental Australiana (Hall, 2011). O território é constituído maioritariamente por rochas sedimentares depositadas nessa plataforma continental.

A Formação de Wailuli foi definida por Audley-Charles (1968) e faz parte do conjunto de unidades parautoctones definidas por este autor para Timor-Leste (Fig. 1). Esta formação, de idade Triássico Superior-Jurássico (Fig. 2), é uma espessa sequência de argilitos com intercalações de margas laminadas, calcilitos, argilitos micáceos e arenitos quartzíticos. Para o topo da formação ocorrem conglomerados e argilitos vermelhos (Spencer et al., 2016). Esta sequência depositou-se num ambiente marinho raso como indica a presença de pisólitos com algas, oólitos e bioclastos.

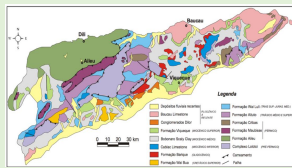


Figura 1. Carta geológica de Timor-Leste (Audley-Charles, 1968 in Carvalho & Lisboa, 2003)

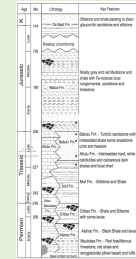


Fig. 2. Sequência estratigráfica da Formação de Wailuli (Spencer et al., 2016)

METODOLOGIA

A área em estudo está localizada na parte central de Timor-Leste, sendo parte do distrito de Manatuto. Foram colhidas 8 amostras em três afloramentos (afloramento A, I e J) ao longo da estrada de ligação entre Manatuto e Laclubar.

As amostras foram preparadas para análises de petrologia orgânica (lâmina de palinofácies e rocha total) e para a determinação de teor em carbono orgânico total (COT), enxofre total (St) e teor em carbonato de cálcio (CaCO₃), seguindo métodos normalizados (ISO 7404-2) ou descritos em Mendonça Filho et al. (2014). A classificação e nomenclatura usadas na descrição da MO em palinofácies e em rocha total são as descritas por Mendonça Filho et al. (2014) e a do ICCP (ICCP, 1998, 2001; Classificação ICCP-TSOP, 2002), respetivamente.

CONCLUSÃO

Os resultados apresentados permitem verificar que a Formação de Wailuli é pobre em MO. Esta formação evidencia um carácter pelítico como mostram os baixos teores de CaCO₃ excepto na amostra FS1A. A observação petrográfica, tanto em palinofácies como em rocha total, apontam para MO essencialmente de origem continental (vegetais superiores terrestres). A presença de betumes sólidos e zooclastos foi detectada em ambas as análises. Diferentes tipos de betumes sólidos foram observados nos afloramentos A e I encontrando-se a preencher os espaços vazios na fração inorgânica. Os valores de reflectância da vitrinite sugerem que a MO da Formação de Wailuli apresenta maturação térmica na fase da catagénesis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Audley-Charles, M.G., 1968. The Geology of Portuguese Timor. Geological Society London Memoirs 4, 1–76.
Carvalho, J. & Lisboa, V., 2003. Breve panorâmica sobre os recursos geológicos não metálicos em Timor-Leste. In: VI Congresso Nacional de Geologia, 4 a 6 de junho de 2003.
Hall, R., 2011. Australia–SE Asia collision: plate tectonics and crustal flow. In: Hall, R., Cottam, M.A., Wilson, M.E.J. (Eds.) The SE Asian Gateway. History and Tectonics of the Australia–Asia Collision. Geological Society, London, Special Publications 355, 75–109.
ICCP-TSOP Classification, 2002. Status Report on TSOP-ICCP Dispersed Organic Matter Classification Working Group. The Society for Organic Petrology Newsletter 19, 14–15.
International Committee for Coal and Organic Petrology (ICCP), 1998. The new vitrinite classification (ICCP System 1994). Fuel 77, 349–355.
International Committee for Coal and Organic Petrology (ICCP), 2001. The new inertinite classification (ICCP System 1994). Fuel 80, 459–471.
ISO 7404-2, 2009. Methods for the petrographic analysis of coals - Part 2: Methods of preparing coal samples. International Organization for Standardization, 12 pp.
Mendonça Filho, J.G., Meneses, T.R., Mendonça, J.O., 2014. Organic Composition (Palynofacies Analysis). In: ICCP Training Course on Dispersed Organic Matter. 7th Course in Organic Matter. GFZ, Potsdam, Germany, 35–64.
Spencer, C.J., Harris, R.A., Major, J.R., 2016. Provenance of Permian–Triassic Gondwana Sequence units ascribed to the Banda Arc in the Timor region. Constraints from zircon U–Pb and Hf isotopes. Gondwana Research 38, 28–39.

Agradecimentos: Este trabalho teve a colaboração do ICT (projeto UID / GEO / 04683/2013) financiado pela União Europeia através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional, enquadrado em COMPETE 2020 (Programa Operacional para a Competitividade e Internacionalização), com a referência POCI-01-0145-FEDER-007690.

RESULTADOS

Os valores de COT (Tab. 1) variam entre 0,05% e 0,88% indicando que as amostras são muito pobres em MO como resultado da fraca deposição e/ou preservação. O St (Tab.1) é baixo (menor que 0,10%) e o CaCO₃ oscila entre 7% e 25% (Tab.1) evidenciando o carácter pelítico da formação. A excepção é a amostra FS1A, que apresenta o teor em CaCO₃ de 46% (Tab. 1), indicativo de um carácter carbonatado.

Tabela 1. Resultados da análise geoquímica das amostras estudadas.

Afloramento	Amostra	COT (%)	St (%)	CaCO ₃ (%)
A	FS1A	0,096	0,01	46
	FS2A	0,12	0,030	25
I	FS1I	0,12	ND	13
	FS2I	0,88	0,078	9
	FS3I	0,31	0,046	11
J	FS1J	0,053	ND	9
	FS2J	0,67	0,080	7
	FS3J	0,064	0,040	10

ND: não detetado.

A análise de palinofácies mostrou um predomínio de fitoclastos (Fig. 3A-B) não opacos não bioestruturados (MO de origem continental), por vezes degradados, o que está de acordo com a fraca preservação da MO particulada. MO algal (marinha e lacustre) também foi observada (Fig. 3B-D). Foram, ainda, identificadas partículas de betumes sólidos, opacos e de pequena dimensão. A ocorrência de zooclastos, também de dimensão reduzida, foi notada.

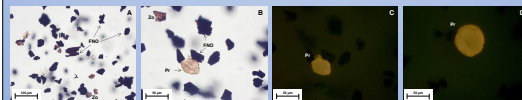


Figura 3. Fotomicrografia da amostra FS2I da Formação de Wailuli. A: Fitoclastos não opacos (FNC) e zooclastos (Zo). B: Fitoclastos não opacos (FNC) e zooclastos (Zo) e alga prasinofita (Pr). C-D: Alga prasinofita. A e B: luz branca transmitida. C e D: Luz azul incidente.

A fração orgânica identificada em rocha total é constituída por macerais predominantemente dos grupos da vitrinite e da inertinite (Fig. 4A, B, D). Nas amostras dos afloramentos I e A identificaram-se, também, betumes sólidos (Fig. C), a preencher espaços vazios na fração inorgânica, e zooclastos. De notar a ocorrência de várias famílias de betumes sólidos com diferentes aspetos petrográficos e reflectância variável. As partículas de vitrinite apresentam formas e tamanhos variados, superfícies irregulares e, por vezes, com fraturas perpendiculares ao alongamento da partícula.

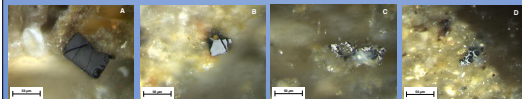


Figura 4. Fotomicrografia em luz branca reflectada das amostras de Formação de Wailuli. A: Vitrinite (FS1I). B: Inertinite (FS1I). C: Betume sólido (FS1I). D: Inertinite (FS2I).

A reflectância da vitrinite (Fig. 5) varia entre 0,7% e 1,5%, apresentando, na sua maioria, valores de 1,0%. Estes valores sugerem que a MO desta formação apresenta maturação térmica na fase da catagénesis. Devido aos baixos teores de COT, não foram encontradas partículas de vitrinite nas amostras do afloramento J.

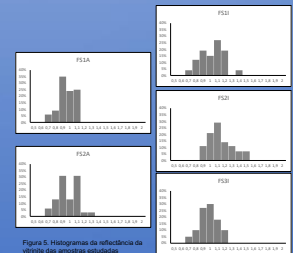


Figura 5. Histogramas da reflectância da vitrinite das amostras estudadas.